



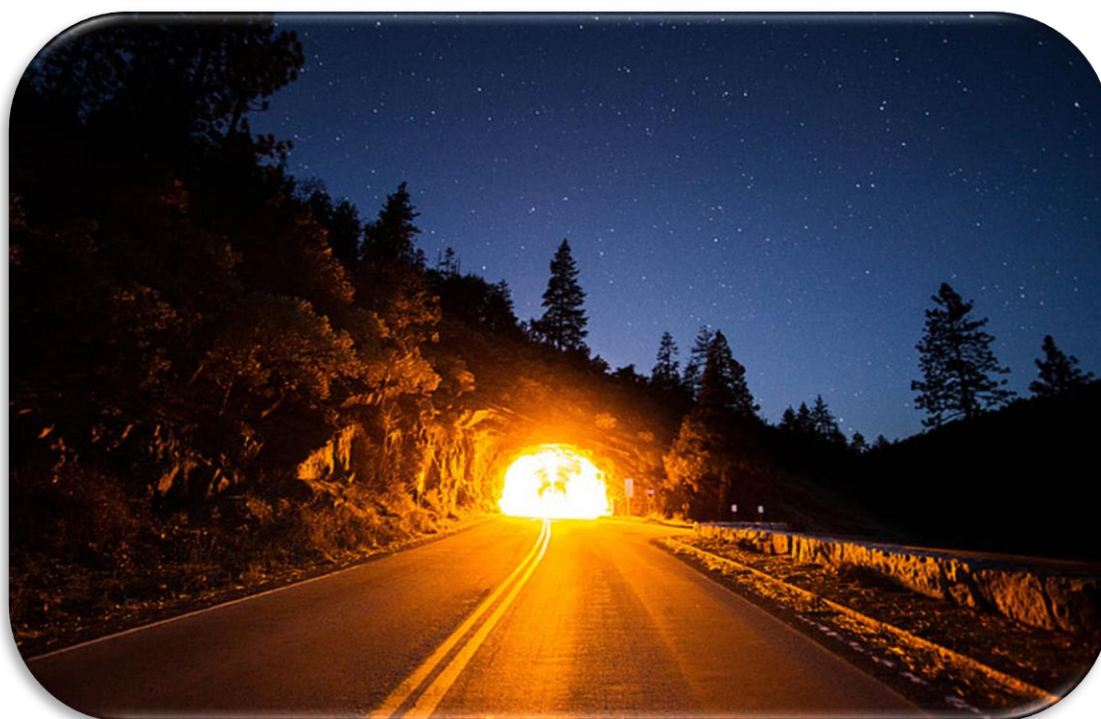
ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

**ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ
ΣΠΟΥΔΩΝ**

ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΑΙ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΥΠΟΓΕΙΩΝ ΕΡΓΩΝ

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ ΤΟΥ ΑΕΡΑ
ΕΝΤΟΣ ΣΙΔΗΡΟΔΡΟΜΙΚΗΣ ΣΗΡΑΓΓΑΣ ΣΤΗΝ
ΥΓΕΙΑ ΤΩΝ ΕΠΙΒΑΤΩΝ ΣΕ ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ ΕΚΔΗΛΩΣΗΣ
ΠΥΡΚΑΓΙΑΣ**



ΓΚΑΝΑ ΔΑΦΝΗ

ΕΠΙΒΛΕΠΟΥΣΑ: ΜΕΝΕΓΑΚΗ ΜΑΡΙΑ

ΑΘΗΝΑ 2021

Ευχαριστίες

Με την ολοκλήρωση της Μεταπτυχιακής μου εργασίας και συνεπώς των μεταπτυχιακών μου σπουδών, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά όλους όσους συνέβαλαν στην ολοκλήρωσή της, αλλά και όλους όσους στήριξαν τη φοιτητική μου πορεία.

Αρχικά θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά την Μενεγάκη Μαρία, Επίκουρη καθηγήτρια της Σχολής Μηχανικών Μεταλλείων - Μεταλλουργών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, για την ανάθεση και επίβλεψη της παρούσας Μεταπτυχιακής Εργασίας, την υποστήριξη και την πολύτιμη καθοδήγησή της σε όλα τα στάδια εκπόνησής της, καθώς και για την εξαιρετική συνεργασία μας.

Επιπλέον, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κ. Καλλιανιώτη Αναστάσιο, Δρ. Μηχανικό Μεταλλείων - Μεταλλουργός, του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, για την συμβολή του στην ολοκλήρωση της εργασίας και τις πολύ χρήσιμες συμβουλές της.

Επίσης, θα ήθελα να εκφράσω την εκτίμηση μου στο Thunderhead Engineering group, για την παροχή ακαδημαϊκής άδειας χρήσης για εργασία στη πλατφόρμα Pyrosim και Pathfinder, καθώς και για την αρεστή και άμεση συνεργασία των μελών του.

Κλείνοντας, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένεια και τους φίλους μου για την υποστήριξη που μου προσέφεραν καθ' όλη τη διάρκεια των σπουδών μου.

Εκτενής Περίληψη

Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι η μελέτη επίδρασης της ταχύτητας του αέρα εντός σιδηροδρομικής σήραγγας στην υγεία των επιβατών σε περίπτωση εκδήλωσης πυρκαγιάς. Για την καλύτερη κατανόηση της εκκένωσης και την υγεία των επιβατών χρησιμοποιούνται συγκεκριμένα μοντέλα προσομοίωσης. Στη συνέχεια, προσδιορίζονται διάφορα σενάρια φωτιάς σε σιδηροδρομική σήραγγα 1200 m και η επίπτωση των προϊόντων της καύσης στον άνθρωπο. Ακολουθώς, εκτελούνται κάποιες αναλύσεις για την εξάπλωση της φωτιάς και των προϊόντων της στο συγκεκριμένο υπόγειο χώρο με τη βοήθεια του λογισμικού προσομοίωσης Pyrosim. Έπειτα, πραγματοποιούνται προσομοιώσεις για την εκκένωση του χώρου με το πρόγραμμα Pathfinder χρησιμοποιώντας πάντα τα αποτελέσματα των αναλύσεων του Pyrosim για κάθε διαφορετικό σενάριο. Τα αποτελέσματα του προγράμματος δυναμικής προσομοίωσης φωτιάς εισάγονται στο πρόγραμμα εκκένωσης, ώστε να εξεταστεί η επιρροή των σεναρίων φωτιάς στο χρόνο εκκένωσης. Τέλος, λαμβάνονται υπόψη ο δείκτης FED of Toxicity από τη διαδικασία της εκκένωσης βάσει των χρόνων της, οι οποίοι δείχνουν πως επηρεάζεται η υγεία των χρηστών του σταθμού κατά τη διάρκεια της εκκένωσης.

Σενάρια

Σκοπός δημιουργίας των σεναρίων είναι η μελέτη επίδρασης της ταχύτητας του αέρα εντός σιδηροδρομικής σήραγγας στην υγεία των επιβατών σε περίπτωση εκδήλωσης πυρκαγιάς.

Η φωτιά που ξεσπά στο μέσο της σιδηροδρομικής σήραγγας οφείλεται σε ηλεκτρολογική βλάβη του βαγονιού με αποτέλεσμα την άμεση εκκένωση των επιβαινόντων. Τα προβλήματα της εκκένωσης ξεκινούν από την στιγμή που οι άνθρωποι μόλις αντιληφθούν την φωτιά προσπαθούν να εγκαταλείψουν το βαγόνι που φλέγεται. Αυτό συμβαίνει διότι με το που βγουν από το βαγόνι δεν έχουν καλή ορατότητα λόγω του καπνού που δημιουργείται στη σήραγγα την συγκεκριμένη στιγμή. Μετέπειτα ο καπνός που εισπνέουν επηρεάζει την υγεία των ανθρώπων όπως και η θερμοκρασία που δημιουργείται λόγω της φωτιάς όσο περνάει ο χρόνος τόσο χειροτερεύει με αποτέλεσμα την άμεση χρονική αντιμετώπιση της εκκένωσης. Ακριβώς για αυτούς τους λόγους πραγματοποιήθηκε προσομοίωση διάφορων σεναρίων που έχουν να κάνουν με τον αερισμό που φυσάει προς την διαδρομή αποφυγής των επιβατών. Ακριβέστερα, τα αποτελέσματα που θα προκύψουν όταν η ταχύτητα αέρα είναι 0 m/s ή όταν έχουμε μια κίνηση του αέρα μέσα στη σήραγγα. Τα σενάρια είναι τα εξής (Πίνακας 9):

Πίνακας 1: Χαρακτηριστικά σεναρίων

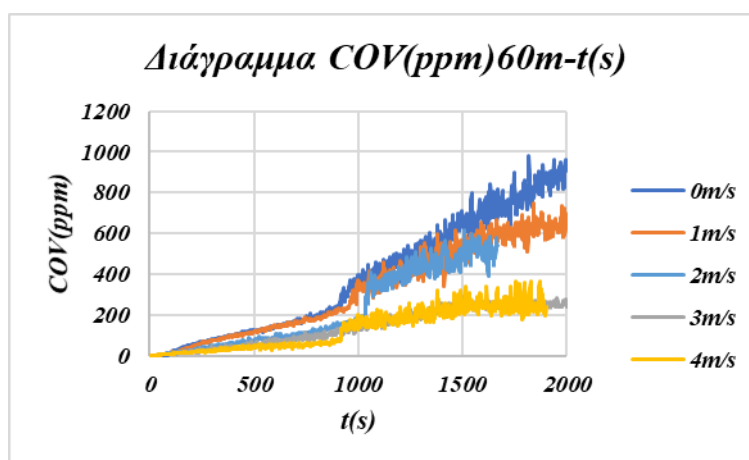
Σενάριο	αέρας
Σενάριο 1	0 m/s
Σενάριο 2	1 m/s
Σενάριο 3	2 m/s
Σενάριο 4	3 m/s
Σενάριο 5	4 m/s

Αποτελέσματα σεναρίων Pyrosim

Τα αποτελέσματα που προκύπτουν απ' όλα τα σενάρια σε σχέση με τις διάφορες ταχύτητες αερισμού και το μονοξείδιο του άνθρακα είναι τα εξής:

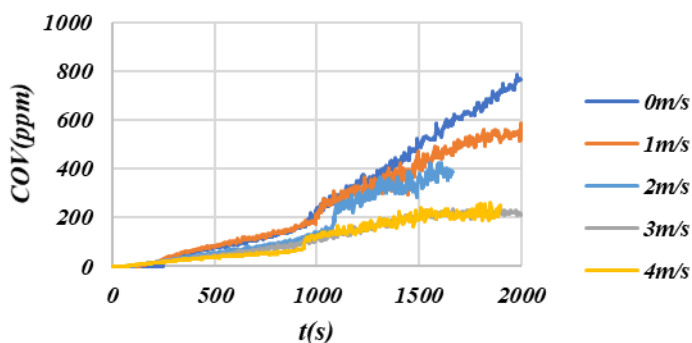
Μονοξείδιο του άνθρακα CO της οροφής της σήραγγας

Για το μονοξείδιο του άνθρακα (CO) της οροφής της σήραγγας σε διάφορες αποστάσεις από την φωτιά παρατηρούνται από τα παρακάτω διαγράμματα (Διάγραμμα 156, 157, 158, 159 και 160 αντίστοιχα) ότι με την αύξηση της ταχύτητας του αέρα, μειώνεται η συγκέντρωση του μονοξειδίου του άνθρακα στην οροφή.



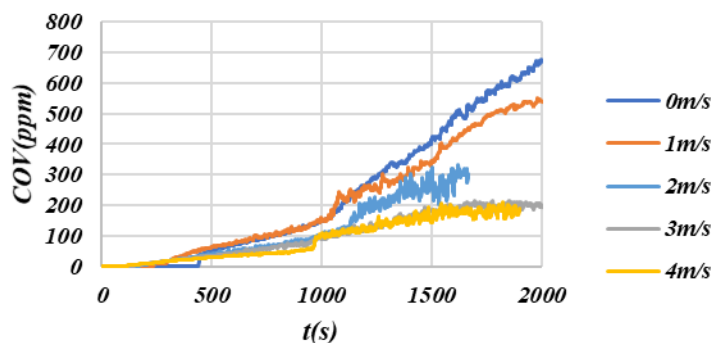
Διάγραμμα 1: Διάγραμμα συσχέτισης ταχυτήτων του αέρα σε συνάρτηση με το μονοξείδιο του άνθρακα κατά το πέρας του χρόνου, στην οροφή της σήραγγας (απόσταση 60m).

Διάγραμμα COV(ppm)180m-t(s)



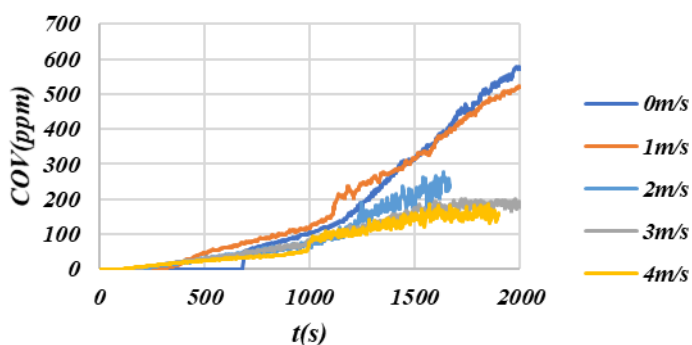
Διάγραμμα 2: Διάγραμμα συσχέτισης ταχυτήτων του αέρα σε συνάρτηση με το μονοξείδιο του άνθρακα κατά το πέρασ του χρόνου, στην οροφή της σήραγγας (απόσταση 180 m).

Διάγραμμα COV(ppm)300m-t(s)



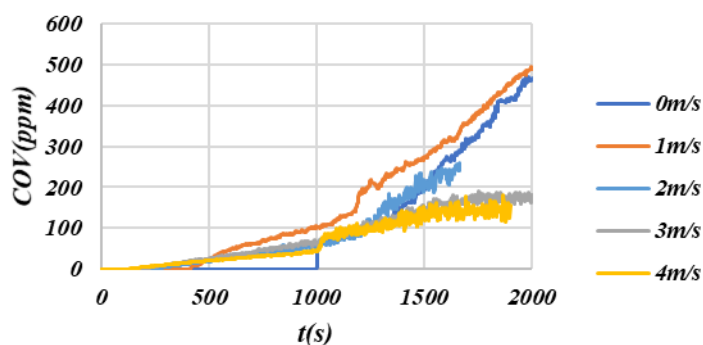
Διάγραμμα 3: Διάγραμμα συσχέτισης ταχυτήτων του αέρα σε συνάρτηση με το μονοξείδιο του άνθρακα κατά το πέρασ του χρόνου, στην οροφή της σήραγγας (απόσταση 300 m).

Διάγραμμα COV(ppm)420m-t(s)



Διάγραμμα 4: Διάγραμμα συσχέτισης ταχυτήτων του αέρα σε συνάρτηση με το μονοξείδιο του άνθρακα κατά το πέρασ του χρόνου, στην οροφή της σήραγγας (απόσταση 420 m).

Διάγραμμα COV(ppm)540m-t(s)

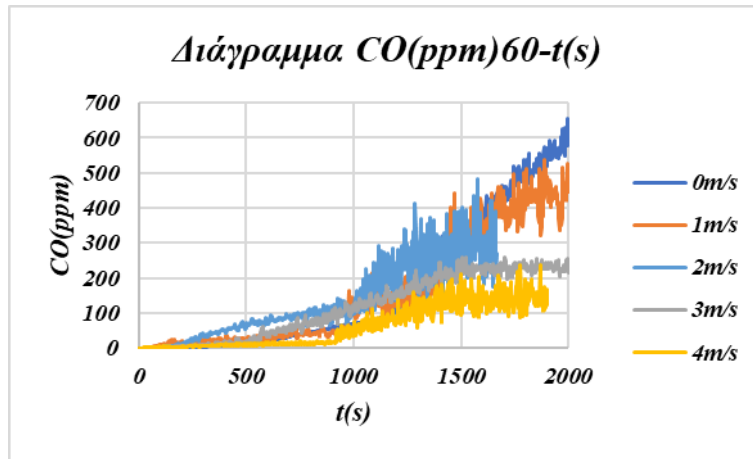


Διάγραμμα 5: Διάγραμμα συσχέτισης ταχυτήτων του αέρα σε συνάρτηση με το μονοξείδιο του άνθρακα κατά το πέρασ του χρόνου, στην οροφή της σήραγγας (απόσταση 540 m).

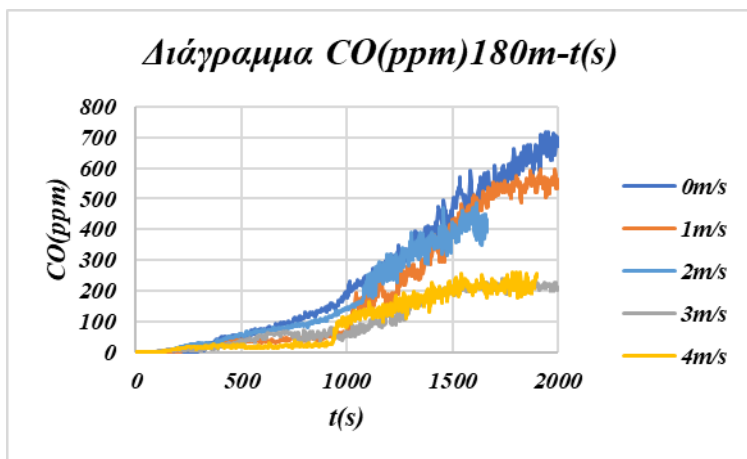
Μονοξείδιο του άνθρακα CO στην όδευση διαφυγής της σήραγγας

Για το μονοξείδιο του άνθρακα (CO) στην όδευση διαφυγής της σήραγγας, σε διάφορες αποστάσεις από την φωτιά, παρατηρούνται από τα παρακάτω διαγράμματα (Διάγραμμα 161, 162, 163, 164 και 165 αντίστοιχα) ότι με την αύξηση την ταχύτητας του αέρα, μειώνεται η συγκέντρωση του μονοξειδίου του άνθρακα στην όδευση διαφυγής. Συμπεραίνεται ότι η μεγάλη ταχύτητα του αέρα έχει ως αποτέλεσμα να απομακρύνει τα τοξικά αέρια πιο γρήγορα, δηλαδή να κρατάει πιο χαμηλή τη συγκέντρωση του μονοξειδίου του άνθρακα. Επίσης όταν αυξάνεται η ταχύτητα του αέρα, αυξάνεται η συγκέντρωση του μονοξειδίου του άνθρακα πιο νωρίς κατά μήκος της σήραγγας αλλά όχι σε υψηλές τιμές. Από τη συσχέτιση των διαγραμμάτων και των βιβλιογραφικών δεδομένων αποφαίνεται ότι η συγκέντρωση του μονοξειδίου του

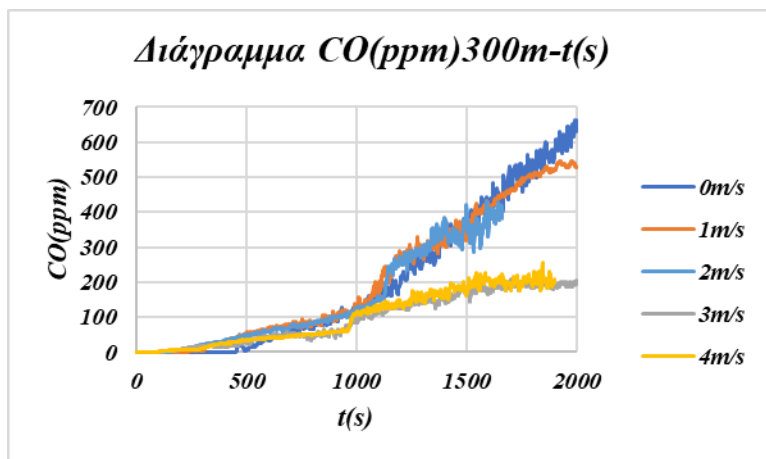
άνθρακα δεν ξεπερνά το κρίσιμο όριο θνησιμότητας (12000 ppm) και επομένως είναι αποτελεσματική η διαδικασία της εκκένωσης. Παρόλα αυτά παρακάτω γίνεται εκτενέστερη μελέτη μέσω του προγράμματος Pathfinder για την εξακρίβωση και ποσοτικοποίηση των τοξικών αερίων.



Διάγραμμα 6: Διάγραμμα συσχέτισης ταχυτήτων του αέρα σε συνάρτηση με το μονοξείδιο του άνθρακα κατά το πέρασ του χρόνου, στην όδευση διαφυγής της σήραγγας (απόσταση 60m).

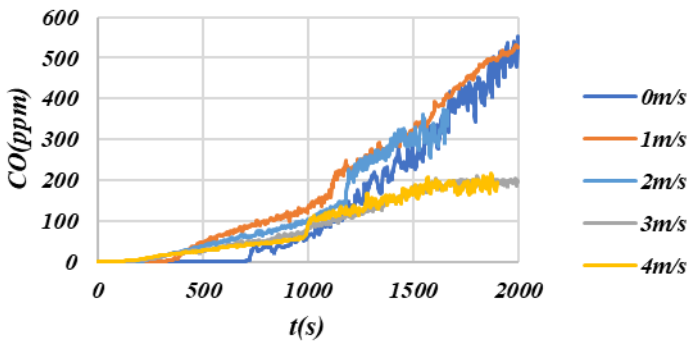


Διάγραμμα 7: Διάγραμμα συσχέτισης ταχυτήτων του αέρα σε συνάρτηση με το μονοξείδιο του άνθρακα κατά το πέρασ του χρόνου, στην όδευση διαφυγής της σήραγγας (απόσταση 180m).



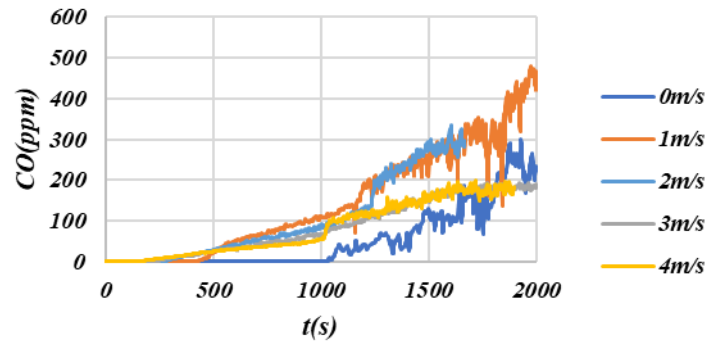
Διάγραμμα 8: Διάγραμμα συσχέτισης ταχυτήτων του αέρα σε συνάρτηση με το μονοξείδιο του άνθρακα κατά το πέρασ του χρόνου, στην όδευση διαφυγής της σήραγγας (απόσταση 300m).

Διάγραμμα CO(ppm)420m-t(s)



Διάγραμμα 9: Διάγραμμα συσχέτισης ταχυτήτων του αέρα σε συνάρτηση με το μονοξείδιο του άνθρακα κατά το πέρασ του χρόνου, στην όδευση διαφυγής της σήραγγας (απόσταση 420m).

Διάγραμμα CO(ppm)540m-t(s)



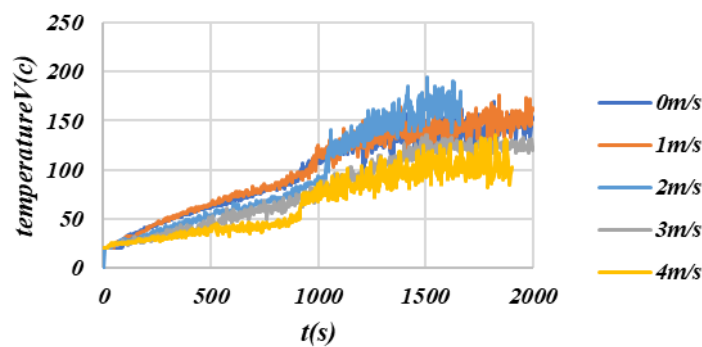
Διάγραμμα 10: Διάγραμμα συσχέτισης ταχυτήτων του αέρα σε συνάρτηση με το μονοξείδιο του άνθρακα κατά το πέρασ του χρόνου, στην όδευση διαφυγής της σήραγγας (απόσταση 540m).

Τα αποτελέσματα που προκύπτουν απ' όλα τα σενάρια σε σχέση με τις διάφορες ταχύτητες αερισμού και τη θερμοκρασία είναι τα εξής:

Θερμοκρασία της οροφής της σήραγγας

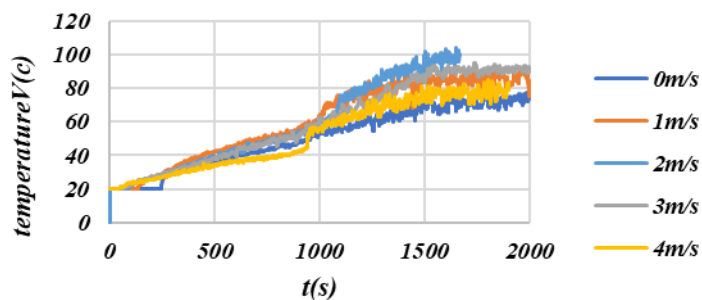
Για τη θερμοκρασία της οροφής της σήραγγας σε διάφορες αποστάσεις από τη φωτιά παρατηρείται από τα παρακάτω διαγράμματα (Διάγραμμα 167, 168, 169 και 170 αντίστοιχα) ότι με την αύξηση την ταχύτητας του αέρα, αυξάνεται η θερμοκρασία. Επίσης στα 60 m (Διάγραμμα 166 αντίστοιχα) με 0 m/s αερισμό είναι υψηλότερη η θερμοκρασία γιατί η ταχύτητα του αέρα σπρώχνει το θερμό καπνό προς την έξοδο της σήραγγας και παρατηρείται αύξηση κατά μήκος της σήραγγας στη θερμοκρασία όσο αυξάνεται ο αέρας. Στη περίπτωση που η ταχύτητα ξεπεράσει τα 3,5 m/s το critical velocity παρατηρούμε ότι αρχίζει να πέφτει πάλι λίγο η θερμοκρασία (χειρότερο σενάριο 3 m/s).

Διάγραμμα temperatureV(c)60m-t(s)



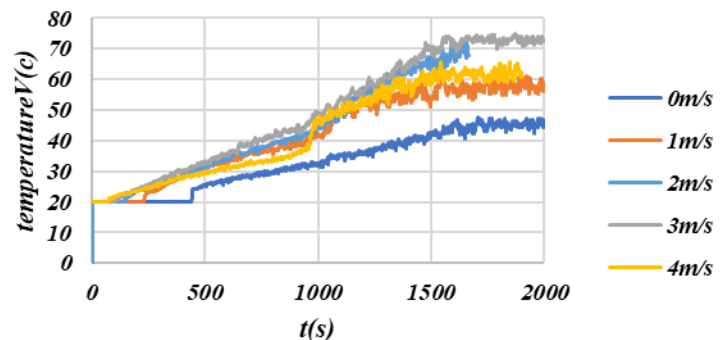
Διάγραμμα 11: Διάγραμμα συσχέτισης ταχυτήτων του αέρα σε συνάρτηση με την θερμοκρασίας κατά το πέρασ του χρόνου, στην οροφή της σήραγγας (απόσταση 60m).

Διάγραμμα temperatureV(c)180m-t(s)



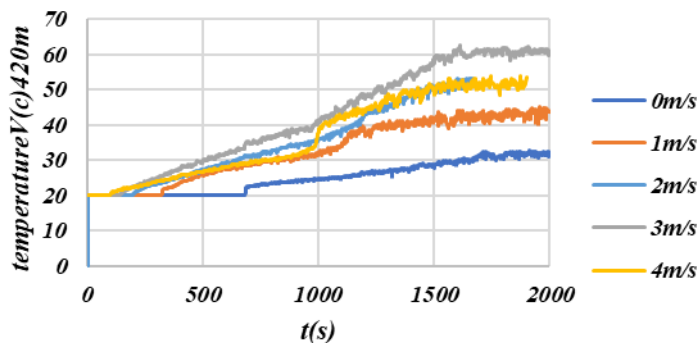
Διάγραμμα 12: Διάγραμμα συσχέτισης ταχυτήτων του αέρα σε συνάρτηση με την θερμοκρασίας κατά το πέρασ του χρόνου, στην οροφή της σήραγγας (απόσταση 180m).

Διάγραμμα temperatureV(c)300m-t(s)



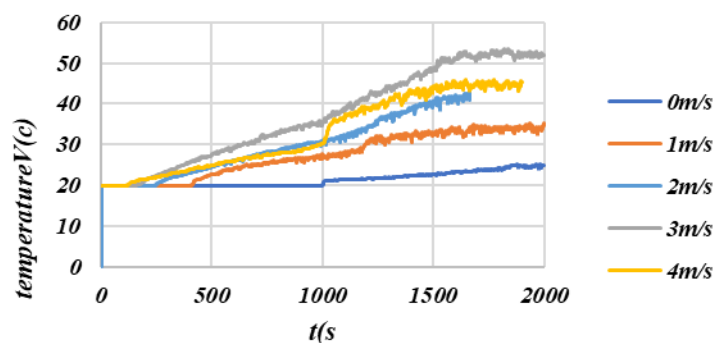
Διάγραμμα 13: Διάγραμμα συσχέτισης ταχυτήτων του αέρα σε συνάρτηση με την θερμοκρασίας κατά το πέρασ του χρόνου, στην οροφή της σήραγγας (απόσταση 300m).

Διάγραμμα temperatureV(c)420m-t(s)



Διάγραμμα 14: Διάγραμμα συσχέτισης ταχυτήτων του αέρα σε συνάρτηση με την θερμοκρασίας κατά το πέρασ του χρόνου, στην οροφή της σήραγγας (απόσταση 420m).

Διάγραμμα temperatureV(c)540m-t(s)



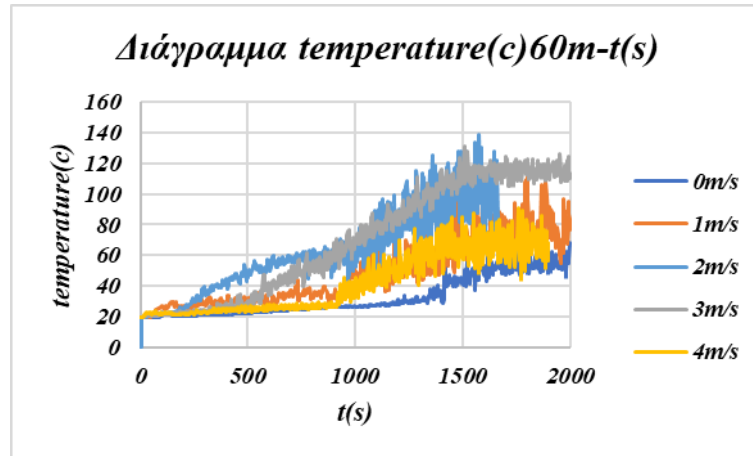
Διάγραμμα 15: Διάγραμμα συσχέτισης ταχυτήτων του αέρα σε συνάρτηση με την θερμοκρασίας κατά το πέρασ του χρόνου, στην οροφή της σήραγγας (απόσταση 540m).

Θερμοκρασία στην όδευση διαφυγής της σήραγγας

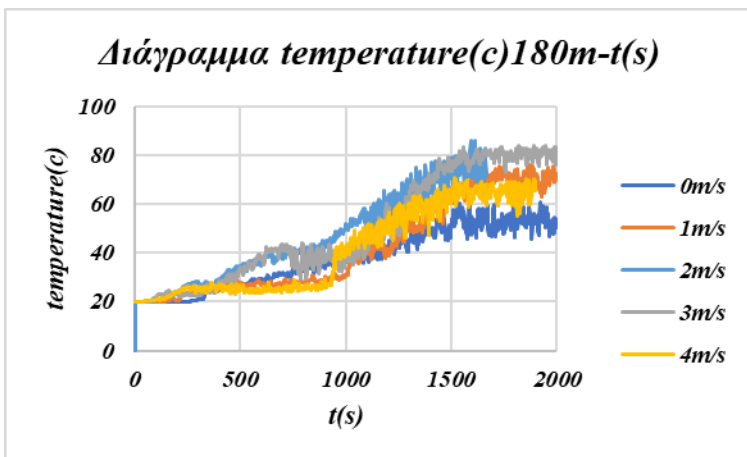
Για τη θερμοκρασία στην όδευση διαφυγής της σήραγγας, σε διάφορες αποστάσεις από την φωτιά, παρατηρείται από τα παρακάτω διαγράμματα (Διάγραμμα 171, 172, 173, 174 και 175 αντίστοιχα) ότι με την αύξηση την ταχύτητας του αέρα, αυξάνεται η θερμοκρασία κατά μήκος της σήραγγας.

Η αύξηση θερμοκρασίας δε σημαίνει ότι επηρεάζει την εκκένωση, διότι αυξάνεται αθροιστικά ενοχλώντας τον άνθρωπό μετά από ένα σημείο. Όμως, η θερμοκρασία είναι κάτω από 120°C. Σύμφωνα με τα βιβλιογραφικά δεδομένα, η ακαριαία θνησιμότητα

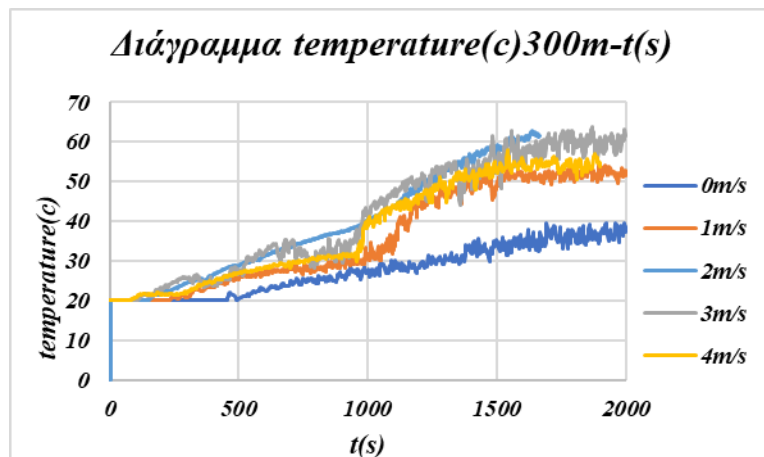
θερμοκρασίας είναι μέχρι 120°C. Εάν η θερμοκρασία αυτή ξεπεραστεί και οι επιβάτες έρθουν αντιμέτωποι με τις συγκεκριμένες συνθήκες, είναι αδύνατη η επιβίωσή τους.



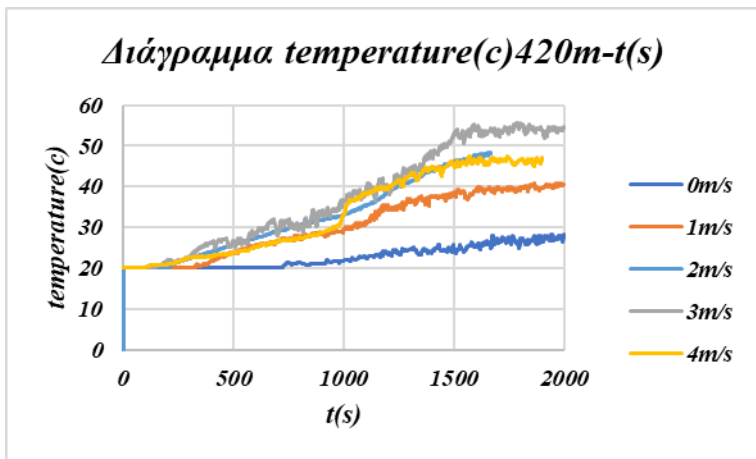
Διάγραμμα 16: Διάγραμμα συσχέτισης ταχυτήτων του αέρα σε συνάρτηση με την θερμοκρασίας κατά το πέρας του χρόνου, στην όδευση διαφυγής της σήραγγας (απόσταση 60m).



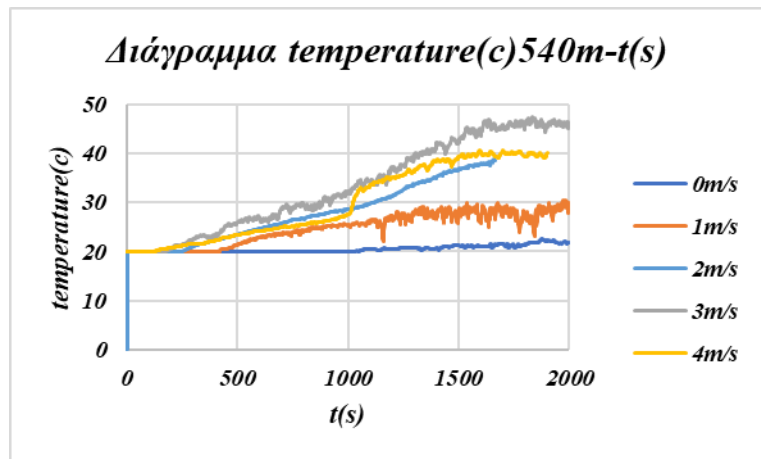
Διάγραμμα 17: Διάγραμμα συσχέτισης ταχυτήτων του αέρα σε συνάρτηση με την θερμοκρασίας κατά το πέρας του χρόνου, στην όδευση διαφυγής της σήραγγας (απόσταση 180m).



Διάγραμμα 18: Διάγραμμα συσχέτισης ταχυτήτων του αέρα σε συνάρτηση με την θερμοκρασίας κατά το πέρας του χρόνου, στην όδευση διαφυγής της σήραγγας (απόσταση 300m).



Διάγραμμα 19: Διάγραμμα συσχέτισης ταχυτήτων του αέρα σε συνάρτηση με την θερμοκρασίας κατά το πέρασ του χρόνου, στην όδευση διαφυγής της σήραγγας (απόσταση 420m).

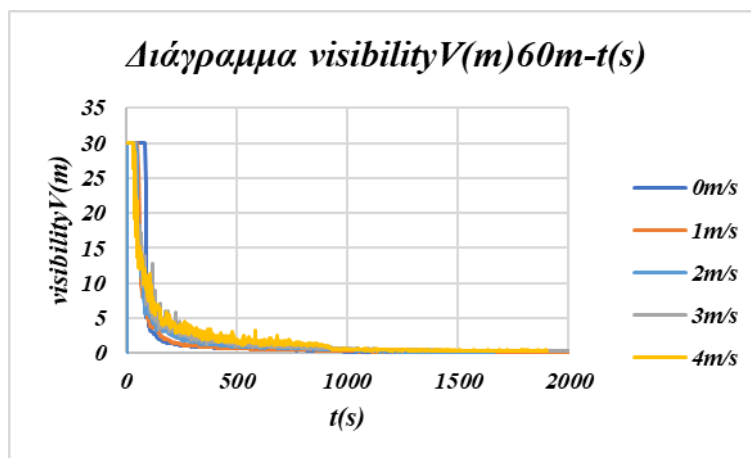


Διάγραμμα 20: Διάγραμμα συσχέτισης ταχυτήτων του αέρα σε συνάρτηση με την θερμοκρασίας κατά το πέρασ του χρόνου, στην όδευση διαφυγής της σήραγγας (απόσταση 540m).

Τα αποτελέσματα που προκύπτουν απ' όλα τα σενάρια σε σχέση με τις διάφορες ταχύτητες αερισμού και την ορατότητα είναι τα εξής:

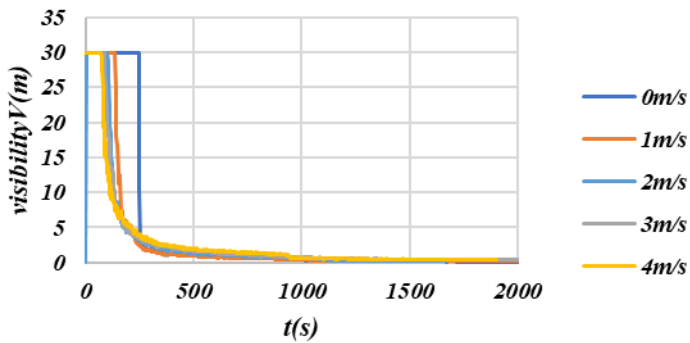
Ορατότητα της οροφής της σήραγγας

Η ορατότητα της οροφής της σήραγγας σε διάφορες αποστάσεις από τη φωτιά παρατηρείται από τα παρακάτω διαγράμματα (Διάγραμμα 176, 178, 179 και 180 αντίστοιχα) ότι η αύξηση της ταχύτητας του αέρα επισπεύδει τη διασπορά του καπνού, με αποτέλεσμα τη μείωση της ορατότητας σε μικρότερο χρονικό διάστημα. Πιο συγκεκριμένα σε όλες της περιπτώσεις πέφτει η ορατότητα κάτω από 2 m/s αλλά στην περίπτωση που δεν έχουμε αέρα 0 m/s είναι αναμενόμενο να καθυστερήσει κατά μήκος της σήραγγας να μειωθεί η ορατότητα.



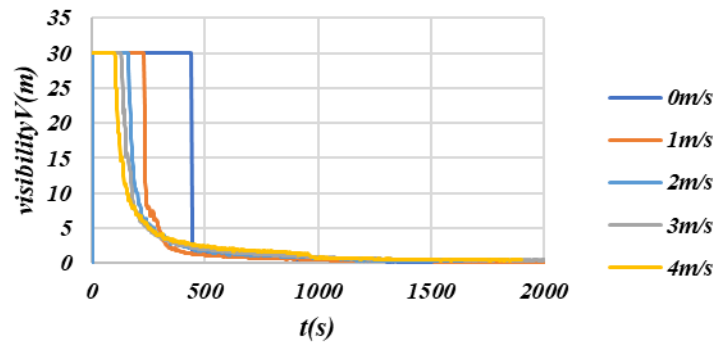
Διάγραμμα 21: Διάγραμμα συσχέτισης ταχυτήτων του αέρα σε συνάρτηση με την ορατότητα κατά το πέρασ του χρόνου, στην οροφή της σήραγγας (απόσταση 60m).

Διάγραμμα visibilityV(m)180m-t(s)



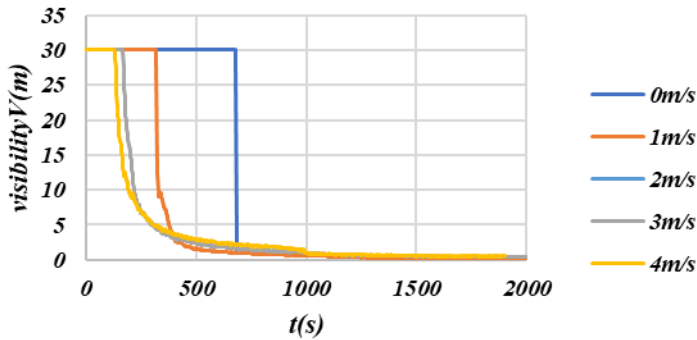
Διάγραμμα 22: Διάγραμμα συσχέτισης ταχυτήτων του αέρα σε συνάρτηση με την ορατότητα κατά το πέρασ του χρόνου, στην οροφή της σήραγγας (απόσταση 180m).

Διάγραμμα visibilityV(m)300m-t(s)



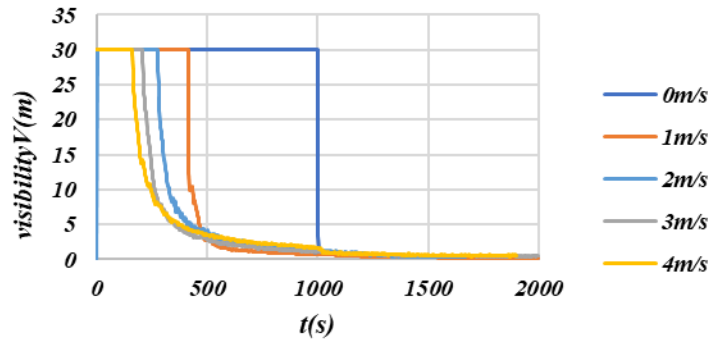
Διάγραμμα 23: Διάγραμμα συσχέτισης ταχυτήτων του αέρα σε συνάρτηση με την ορατότητα κατά το πέρασ του χρόνου, στην οροφή της σήραγγας (απόσταση 300m).

Διάγραμμα visibilityV(m)420m-t(s)



Διάγραμμα 24: Διάγραμμα συσχέτισης ταχυτήτων του αέρα σε συνάρτηση με την ορατότητα κατά το πέρασ του χρόνου, στην οροφή της σήραγγας (απόσταση 420m).

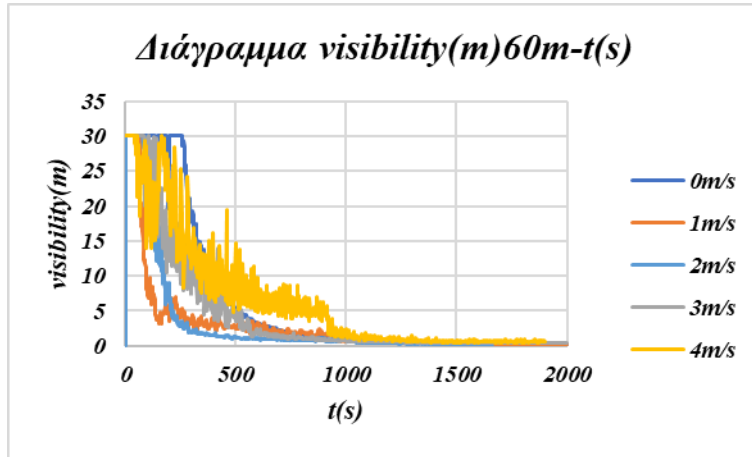
Διάγραμμα visibilityV(m)540m-t(s)



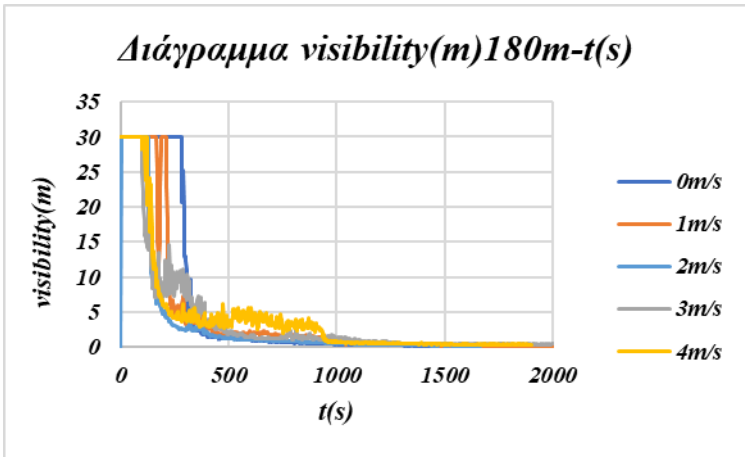
Διάγραμμα 25: Διάγραμμα συσχέτισης ταχυτήτων του αέρα σε συνάρτηση με την ορατότητα κατά το πέρασ του χρόνου, στην οροφή της σήραγγας (απόσταση 540m).

Ορατότητα στην όδευση διαφυγής της σήραγγας

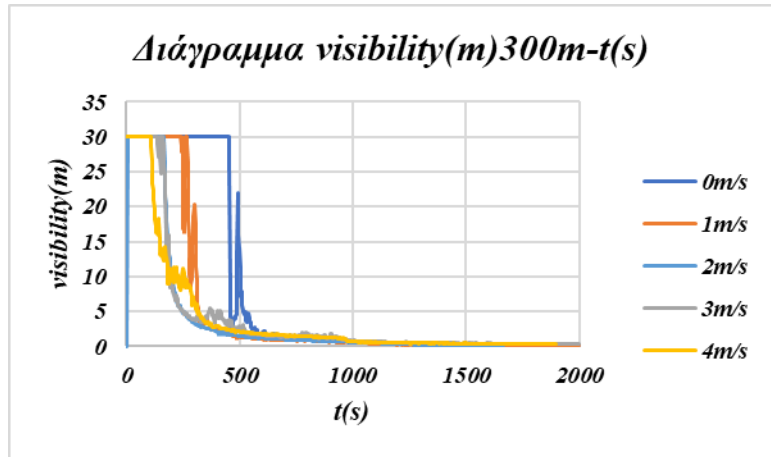
Η ορατότητα στην όδευση διαφυγής της σήραγγας σε διάφορες αποστάσεις από τη φωτιά παρατηρείται από τα παρακάτω διαγράμματα (Διάγραμμα 181, 182, 183 και 184 αντίστοιχα) η αύξηση της ταχύτητας του αέρα επισπεύδει την διασπορά του καπνού, με αποτέλεσμα τη μείωση της ορατότητας σε μικρότερο χρονικό διάστημα. Πιο συγκεκριμένα σε όλες της περιπτώσεις πέφτει η ορατότητα κάτω από 2 m/s αλλά στην περίπτωση που δεν έχουμε αέρα 0 m/s είναι αναμενόμενο να καθυστερήσει κατά μήκος της σήραγγας να μειωθεί η ορατότητα.



Διάγραμμα 26: Διάγραμμα συσχέτισης ταχυτήτων του αέρα σε συνάρτηση με την ορατότητα κατά το πέρας του χρόνου, στην όδευση διαφυγής της σήραγγας (απόσταση 60m).

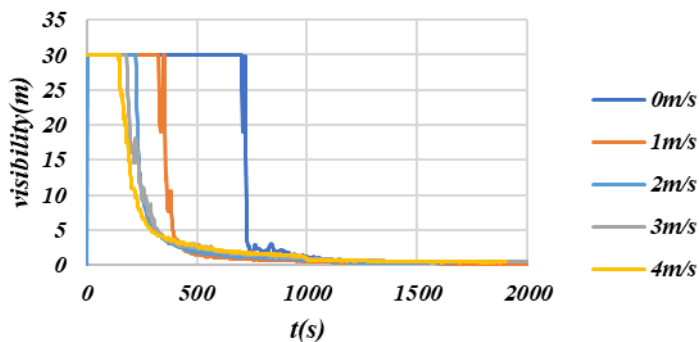


Διάγραμμα 27: Διάγραμμα συσχέτισης ταχυτήτων του αέρα σε συνάρτηση με την ορατότητα κατά το πέρας του χρόνου, στην όδευση διαφυγής της σήραγγας (απόσταση 180m).



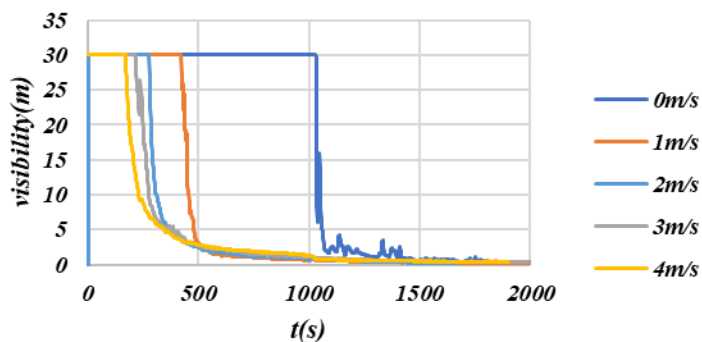
Διάγραμμα 28: Διάγραμμα συσχέτισης ταχυτήτων του αέρα σε συνάρτηση με την ορατότητα κατά το πέρας του χρόνου, στην όδευση διαφυγής της σήραγγας (απόσταση 300m).

Διάγραμμα visibility(m)420m-t(s)



Διάγραμμα 29: Διάγραμμα συσχέτισης ταχυτήτων του αέρα σε συνάρτηση με την ορατότητα κατά το πέρας του χρόνου, στην όδευση διαφυγής της σήραγγας (απόσταση 420m).

Διάγραμμα visibility(m)540m-t(s)



Διάγραμμα 30: Διάγραμμα συσχέτισης ταχυτήτων του αέρα σε συνάρτηση με την ορατότητα κατά το πέρας του χρόνου, στην όδευση διαφυγής της σήραγγας (απόσταση 540m).

Προσομοίωση σεναρίων στο Pathfinder

Στη παρούσα μελέτη επιλέχθηκε η προσομοίωση της ακινητοποίησης των επιβατών. Σχεδιάστηκαν τα χαρακτηριστικά της σήραγγας ίδια με τον σχεδιασμό του Pyrosim. Επίσης σχεδιάστηκε και η όδευση διαφυγής. Οι επιβάτες τοποθετήθηκαν σε θέσεις απόστασης από την φωτιά όπως: δίπλα από την φωτιά, 60 m, 180 m, 300 m, 420 m και 540 m.

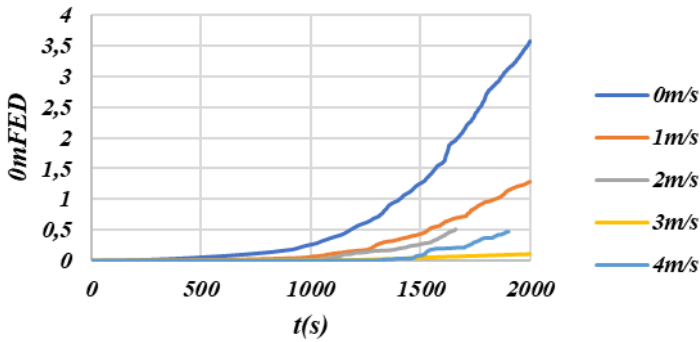


Εικόνα 1: Σχεδιασμός σήραγγας.

Αποτελέσματα σεναρίων Pathfinder

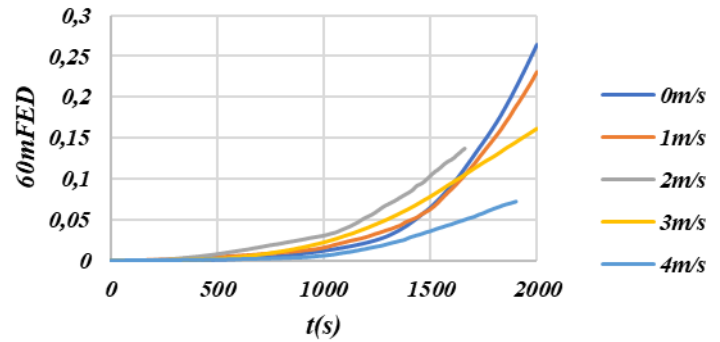
Τα αποτελέσματα που προέκυψαν με την αύξηση της ταχυτήτων του αέρα σε διάφορες αποστάσεις από την φωτιά (Διάγραμμα 217, 218, 219, 220 και 221 αντίστοιχα) παρέμειναν σε τιμές μικρότερες του κρίσιμου ορίου (FED of Toxicity<1) για 2000 s που μελετήσαμε στο ύψος των ανθρώπων. Στο διάγραμμα (Διάγραμμα 216 αντίστοιχα)

Διάγραμμα 0mFED-t(s)



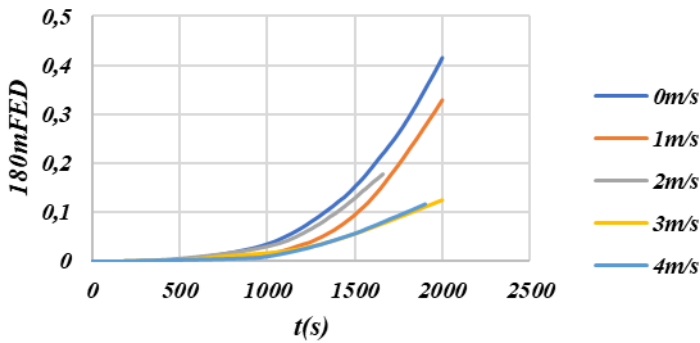
Διάγραμμα 31: Διάγραμμα συσχέτισης ταχυτήτων του αέρα σε συνάρτηση με το FED of Toxicity κατά το πέρασ του χρόνου, στην οροφή της σήραγγας (απόσταση 0m).

Διάγραμμα 60mFED-t(s)



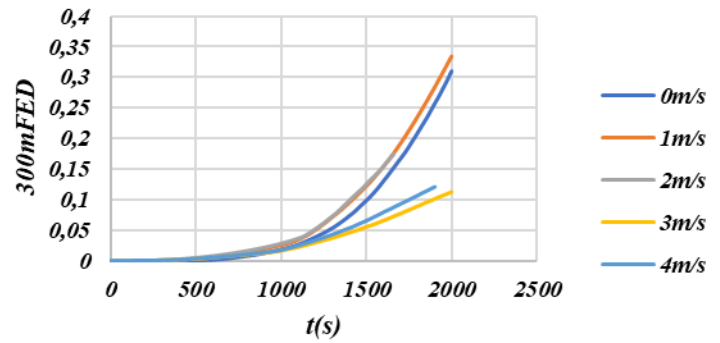
Διάγραμμα 32: Διάγραμμα συσχέτισης ταχυτήτων του αέρα σε συνάρτηση με το FED of Toxicity κατά το πέρασ του χρόνου, στην οροφή της σήραγγας (απόσταση 60m).

Διάγραμμα 180mFED-t(s)



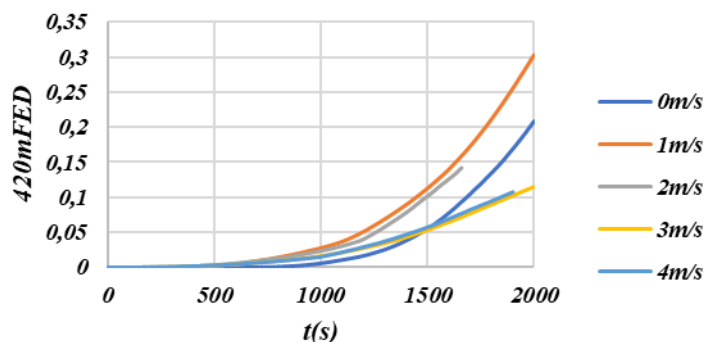
Διάγραμμα 33: Διάγραμμα συσχέτισης ταχυτήτων του αέρα σε συνάρτηση με το FED of Toxicity κατά το πέρασ του χρόνου, στην οροφή της σήραγγας (απόσταση 180m).

Διάγραμμα 300mFED-t(s)

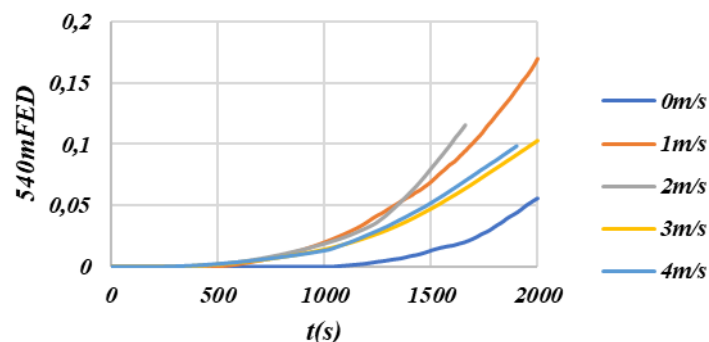


Διάγραμμα 34: Διάγραμμα συσχέτισης ταχυτήτων του αέρα σε συνάρτηση με το FED of Toxicity κατά το πέρασ του χρόνου, στην οροφή της σήραγγας (απόσταση 300m).

Διάγραμμα 420mFED-t(s)



Διάγραμμα 540mFED-t(s)



Διάγραμμα 35: Διάγραμμα συσχέτισης ταχυτήτων του αέρα σε συνάρτηση με το FED of Toxicity κατά το πέρασ του χρόνου, στην οροφή της σήραγγας (απόσταση 420m).

Διάγραμμα 36: Διάγραμμα συσχέτισης ταχυτήτων του αέρα σε συνάρτηση με το FED of Toxicity κατά το πέρασ του χρόνου, στην οροφή της σήραγγας (απόσταση 540m).

με απόσταση 0 m όταν δεν έχουμε ταχύτητα αέρα κοντά στη φωτιά η επιδείνωση είναι υψηλότερη γιατί ο καπνός παράγεται δίπλα στη φωτιά και στην άλλη περίπτωση η ταχύτητα του αέρα τον διώχνει μακριά. Ενώ στα (Διάγραμμα 217, 218 αντίστοιχα) 60 m και 180 m οι τιμές του FED είναι αυξημένες χωρίς ταχύτητα στη συνέχεια όσο απομακρυνόμαστε από την φωτιά παρατηρούμε ότι το FED αυξάνεται πιο γρήγορα γιατί παρόλο που έχουμε μικρότερες συγκεντρώσεις φτάνουν πιο γρήγορα τον καπνό σε αυτά τα σημεία ώστε το FED να ανεβαίνει.

Συμπεράσματα

Στην παρούσα μελέτη, τα αποτελέσματα που προκύπτουν από το πρόγραμμα Pyrosim είναι ότι με την αύξηση ταχύτητας του αέρα οδηγεί σε αύξησή της θερμοκρασίας, και μείωση της συγκέντρωσης του CO και τα δυο λαμβάνουν μέγιστες τιμές πιο γρήγορα κατά μήκος της σήραγγας. Ανάλογα με την ταχύτητα του αέρα που υπάρχει μέσα στη σήραγγα πρέπει να ληφθούν υπόψη και οι δυο παράγοντες για την χρονική στιγμή ανάλογα με τη ταχύτητα αέρα που πρέπει να ξεκινήσει η εκκένωση. Επιπλέον, μειώνεται γρηγορότερα η ορατότητα το οποίο σημαίνει μικρότερη ταχύτητα άρα και μεγαλύτερος χρόνος εκκένωσης με αποτέλεσμα οι επιβάτες να παραμείνουν σε κακές συνθήκες.

Όταν αυξάνεται η ταχύτητα του αέρα γίνεται η χρήση του προγράμματος Pathfinder για την μελέτη του FED of Toxicity. Από τα βιβλιογραφικά δεδομένα το κρίσιμο όριο θνησιμότητας βρίσκεται στην τιμή του 1. Στην παρούσα μελέτη, τα αποτελέσματα που προέκυψαν με την αύξηση της ταχυτήτων του αέρα, παρέμειναν σε τιμές μικρότερες του κρίσιμου ορίου (FED of Toxicity < 1). Ο κανονισμός αναφέρει ότι τιμές του δείκτη ≥ 1 επιφέρουν θάνατο και ότι τα ανεκτά όρια είναι για τιμές $\leq 0,3$ γιατί πάνω από αυτές παρουσιάζονται διαφορά πρόβλημα (αναπνευστικά, αισθήσεων κ.α.). Άρα ως μέγιστο επιτρεπτό όριο για το δείκτη FED of Toxicity τίθεται η τιμή 0,3.

EFFECT OF AIR VELOCITY INSIDE A RAILWAY TUNNEL ON THE HEALTH OF PASSENGERS IN THE EVENT OF FIRE

Extensive Abstract

The purpose of this work is to study the air velocity inside a railway tunnel in the health of passengers in the event of a fire. Specific simulation models are used to better understand evacuation and occupant health. Next, various fire scenarios in a 1200 m railway tunnel and the impact of combustion products on humans are identified. Then, analyzes are performed for the spread of the fire and its products in the specific underground space with the help of the Pyrosim simulation software. The evacuation simulations are performed with the Pathfinder program, using the results of the Pyrosim analyzes for each different scenario. The results of the dynamic fire simulation program are entered into the evacuation program to examine the influence of fire scenarios on evacuation time. Finally, the FED of Toxicity index is considered from the evacuation process based on its times, which show how the health of the station users is affected during the evacuation.

Scenarios

The purpose of the scenarios is to study the effect of air velocity inside a railway tunnel on the health of passengers in the event of a fire.

The fire that broke out in the middle of the railway tunnel is due to an electrical failure of the wagon resulting in the immediate evacuation of the occupants. The problems of evacuation start from the moment when people as soon as they notice the fire try to leave the burning wagon. That is because when they get out of the wagon, they do not have good visibility due to the smoke that is created in the tunnel at that moment. Then the smoke they inhale affects people's health as well as the temperature created by the fire as time goes by, so it gets worse resulting in immediate treatment of the evacuation. It is for these reasons that various scenarios have been simulated that have to do with the ventilation that blows towards the passenger avoidance route. More precisely, the results that will occur when the air speed is 0 m/s or when we have a movement of air in the tunnel. The scenarios are as follows (Table 9):

Scenarios	Ventilation
Scenario 1	0 m/s
Scenario 2	1 m/s
Scenario 3	2 m/s
Scenario 4	3 m/s
Scenario 5	4 m/s

Pyrosim script results

The results obtained from all the scenarios in relation to the different aeration velocities and carbon monoxide are as follows:

Carbon monoxide CO of the tunnel roof

For the carbon monoxide (CO) of the tunnel roof, at various distances from the fire, it is observed from the following diagrams (Diagrams 156, 157, 158, 159 and 160 respectively) that with increasing air velocity, the concentration of carbon monoxide decreases on the roof.

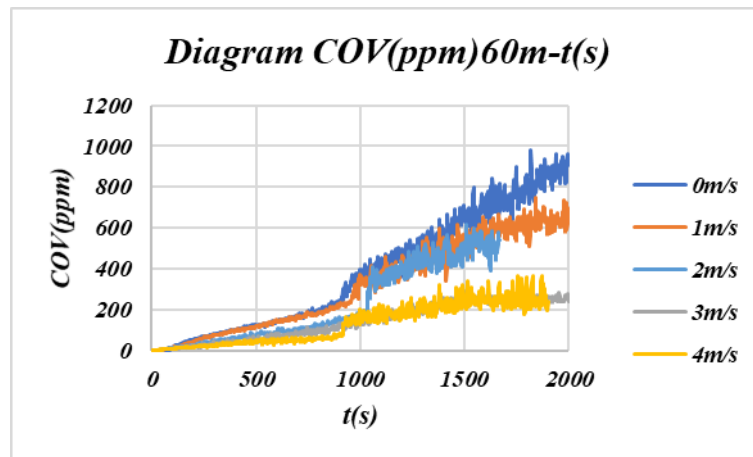


Diagram 156: Diagram of the correlation of ventilation speeds with carbon monoxide over time, on the roof of the tunnel (distance 60m).

Diagram COV(ppm)180m-t(s)

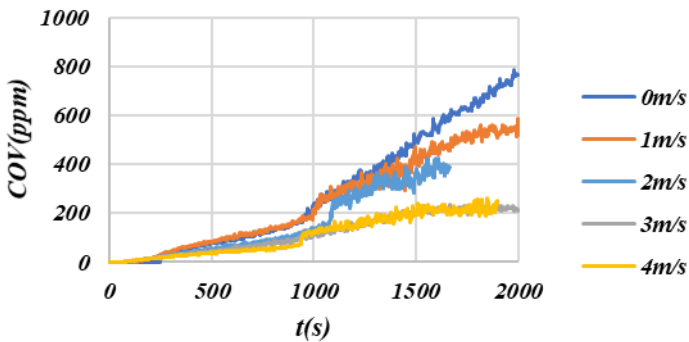


Diagram 157: Diagram of the correlation of ventilation speeds with carbon monoxide over time, on the roof of the tunnel (distance 180 m).

Diagram COV(ppm)300m-t(s)

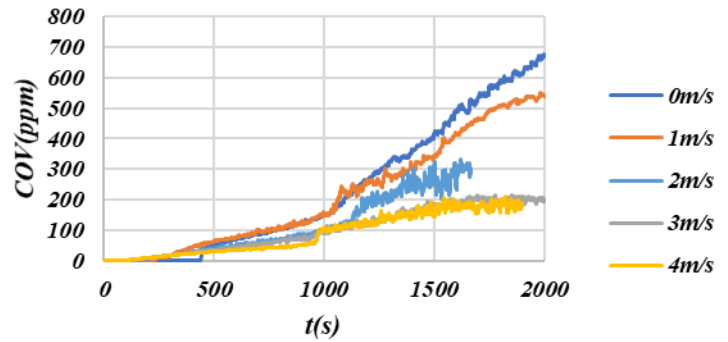


Diagram 158: Diagram of the correlation of ventilation speeds with carbon monoxide over time, on the roof of the tunnel (distance 300 m).

Diagram COV(ppm)420m-t(s)

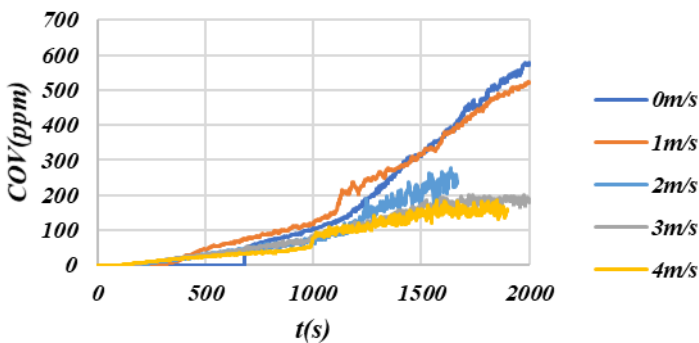


Diagram 159: Diagram of the correlation of ventilation speeds with carbon monoxide over time, on the roof of the tunnel (distance 420 m).

Diagram COV(ppm)540m-t(s)

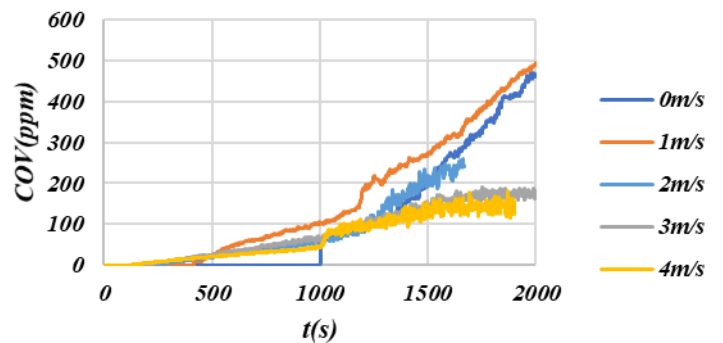


Diagram 160: Diagram of the correlation of aeration velocities in relation to carbon monoxide at the end of time, on the roof of the tunnel (distance 540 m).

Carbon monoxide CO in the tunnel escape route

For carbon monoxide (CO) in the tunnel escape route, at various distances from the fire, it is observed from the following diagrams (Diagrams 161, 162, 163, 164 and 165 respectively) that as the air velocity increases, the concentration of carbon monoxide in the escape route. It is concluded that the high velocity of aeration has the effect of removing toxic gases faster, ie keeping the concentration of carbon monoxide lower. Also, when the air speed increases, the concentration of carbon monoxide increases earlier along the tunnel but not at high values. From the correlation of the diagrams and the bibliographic data it is concluded that the concentration of carbon monoxide does not exceed the critical mortality limit (12000 ppm) and therefore the evacuation process is effective. However, below is a more extensive study through the Pathfinder program for the identification and quantification of toxic gases.

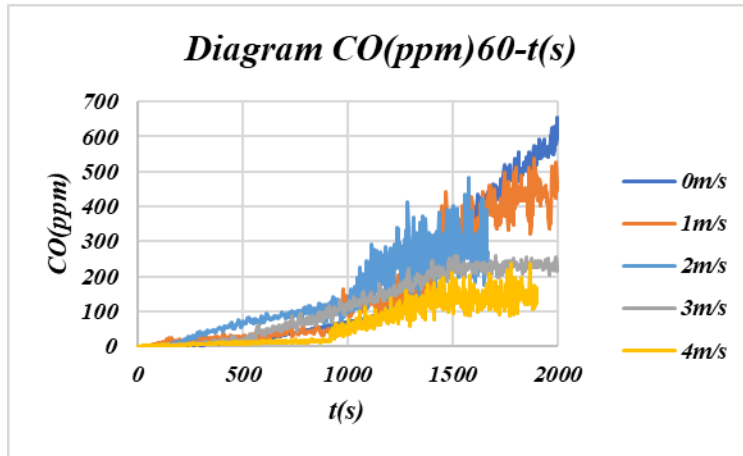


Diagram 161: Diagram of the correlation of aeration speeds in relation to carbon monoxide at the end of time, in the escape route of the tunnel (distance 60m).

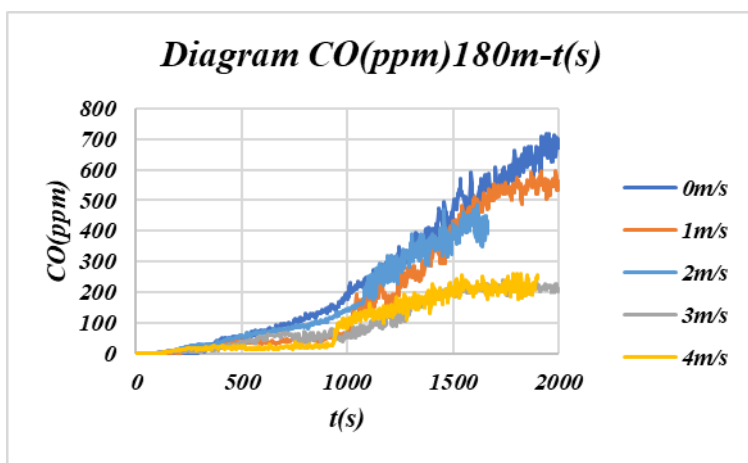


Diagram 162: Diagram of the correlation of aeration speeds in relation to carbon monoxide at the end of time, in the escape route of the tunnel (distance 180m).

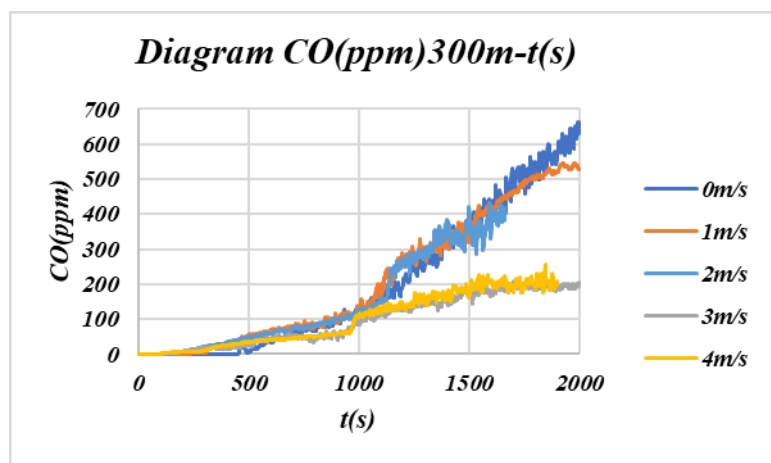


Diagram 163: Diagram of the correlation of aeration speeds in relation to carbon monoxide at the end of time, in the escape route of the tunnel (distance 300m).

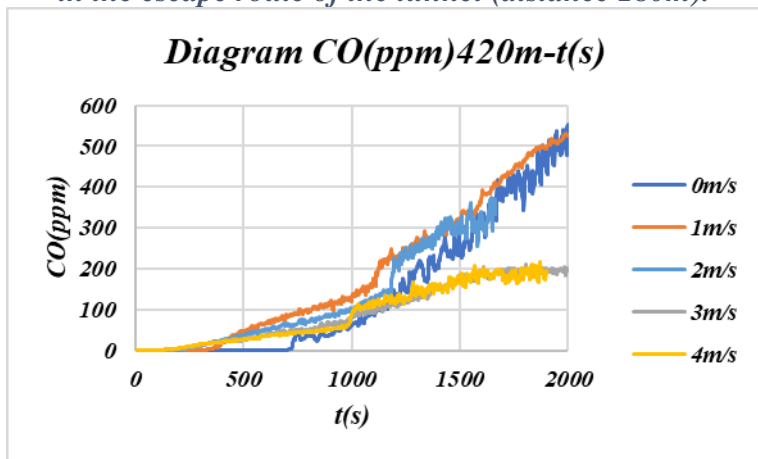


Diagram 164: Diagram of the correlation of aeration speeds in relation to carbon monoxide at the end of time, in the escape route of the tunnel (distance 420m).

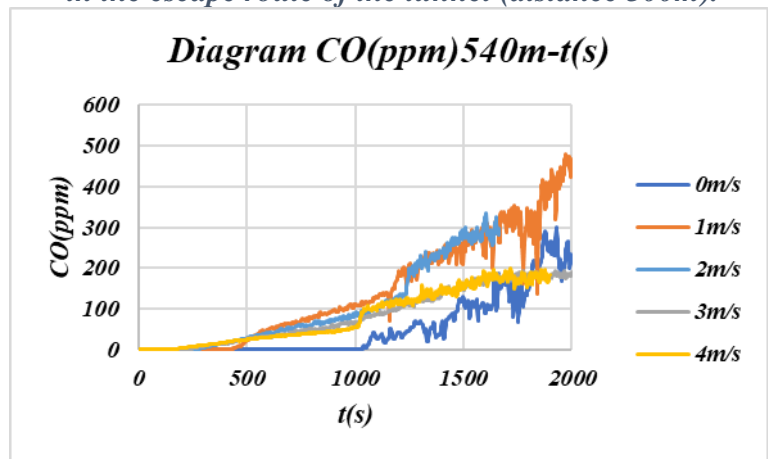


Diagram 165: Diagram of the correlation of aeration speeds in relation to carbon monoxide at the end of time, in the escape route of the tunnel (distance 540m).

The results obtained from all the scenarios in relation to the different ventilation speeds and temperature are as follows:

Tunnel roof temperature

For the temperature of the tunnel roof at various distances from the fire it is observed from the following diagrams (Diagram 167, 168, 169 and 170 respectively) that as the air speed increases, the temperature increases. Also, at 60 m (Diagram 166 respectively) with 0 m / s ventilation the temperature is higher because the air velocity pushes the hot smoke towards the exit of the tunnel and there is an increase along the tunnel in the temperature as the ventilation increases. In case the speed exceeds 3.5 m/s the critical velocity we notice that the temperature starts to drop a little again (worst case scenario 3 m / s).

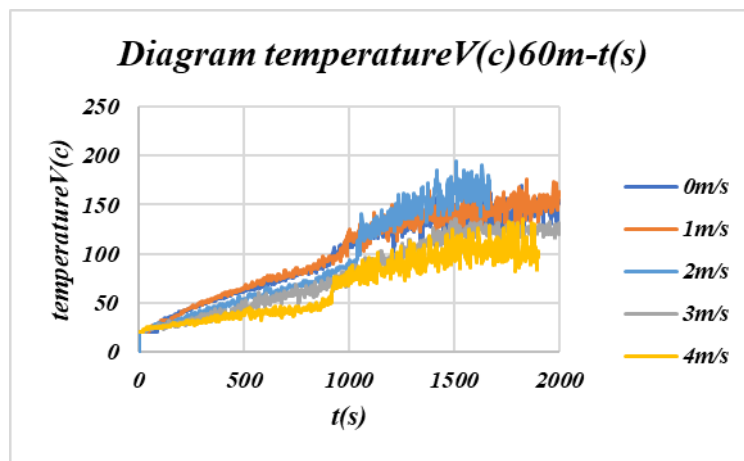


Diagram 166: Diagram of the correlation of ventilation speeds as a function of temperature over time, on the roof of the tunnel (distance 60m).

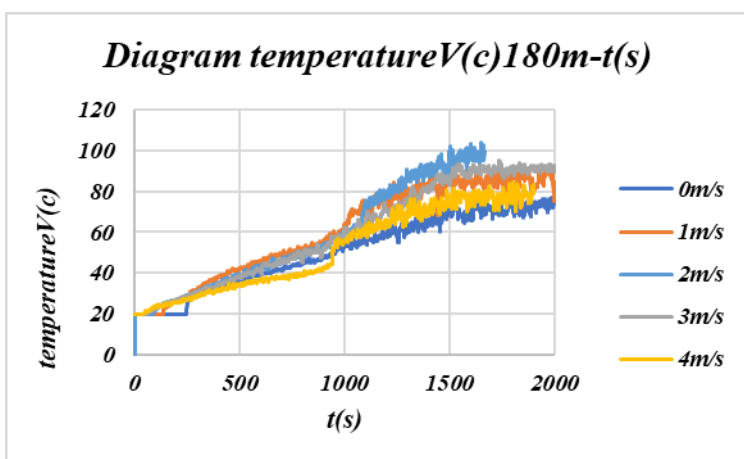


Diagram 167: Diagram of the correlation of ventilation speeds as a function of temperature over time, on the roof of the tunnel (distance 180m).

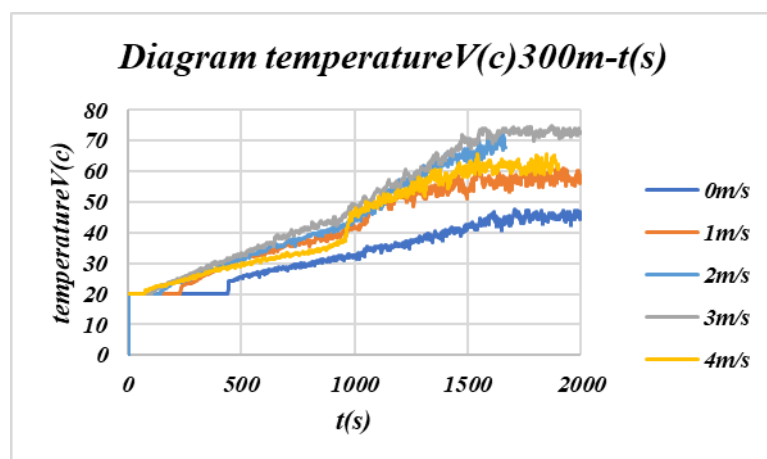


Diagram 168: Diagram of the correlation of ventilation speeds as a function of temperature over time, on the roof of the tunnel (distance 300m).

Diagram temperature $V(c)420m-t(s)$

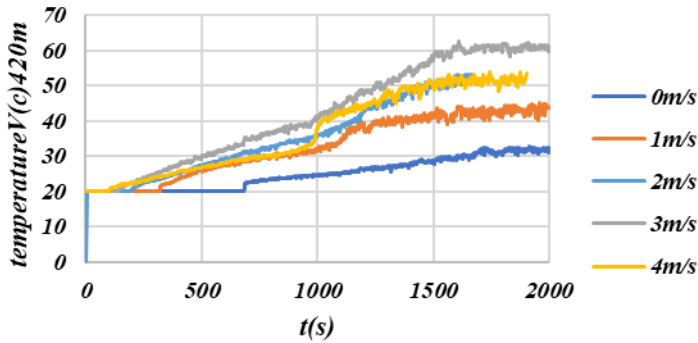


Diagram 169: Diagram of the correlation of ventilation speeds as a function of temperature over time, on the roof of the tunnel (distance 420m).

Diagram temperature $V(c)540m-t(s)$

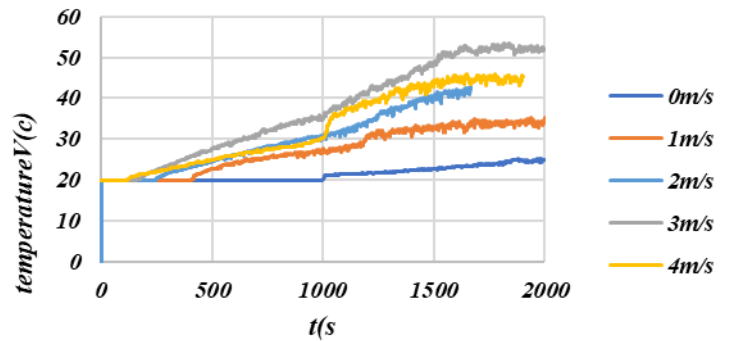


Diagram 170: Diagram of the correlation of ventilation speeds as a function of temperature at the end of time, on the roof of the tunnel (distance 540m).

Temperature in the escape route of the tunnel

For the temperature in the tunnel escape route, at various distances from the fire, it is observed from the following diagrams (Diagrams 171, 172, 173, 174 and 175 respectively) that as the air velocity increases, the temperature along the tunnel increases.

The increase in temperature does not mean that it affects the evacuation, because it increases cumulatively bothering the person after a point. However, the temperature is below 120°C. According to the data, the instantaneous temperature mortality is up to 120°C. If this temperature is exceeded and passengers are faced with these conditions, it is impossible for them to survive.

Diagram temperature (c)60m-t(s)

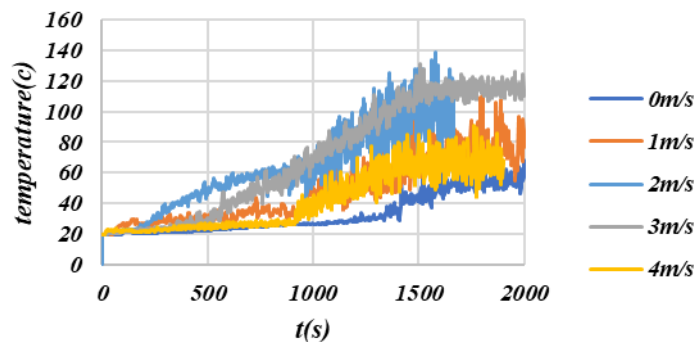


Diagram 171: Diagram of the correlation of ventilation speeds as a function of temperature over time, in the escape route of the tunnel (distance 60m).

Diagram temperature(c)180m-t(s)

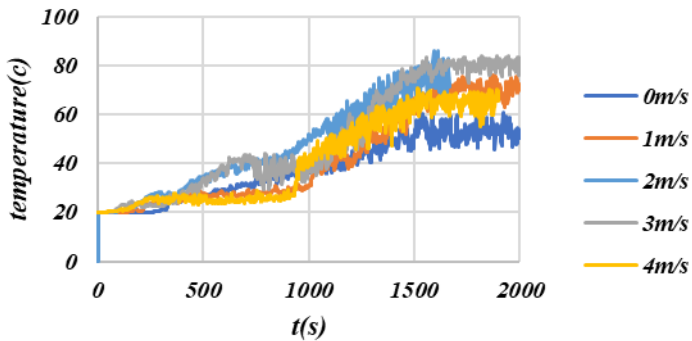


Diagram 172: Diagram of the correlation of ventilation speeds as a function of temperature at the end of time, in the escape route of the tunnel (distance 180m).

Diagram temperature(c)300m-t(s)

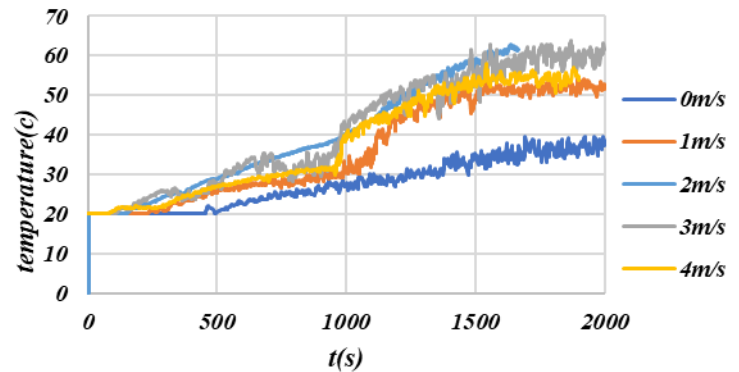


Diagram 173: Diagram of the correlation of ventilation speeds as a function of temperature over time, in the escape route of the tunnel (distance 300m).

Diagram temperature(c)420m-t(s)

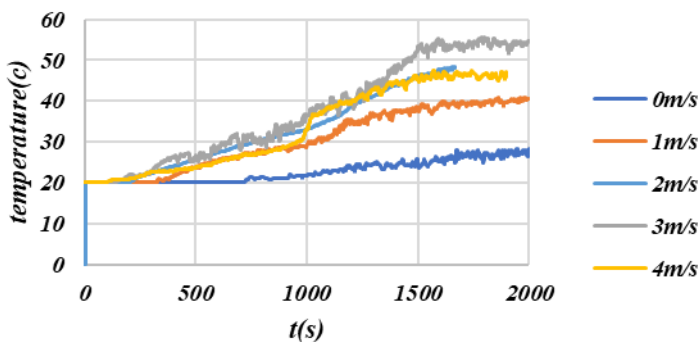


Diagram 174: Diagram of the correlation of ventilation speeds as a function of temperature over time, in the escape route of the tunnel (distance 420m).

Diagram temperature(c)540m-t(s)

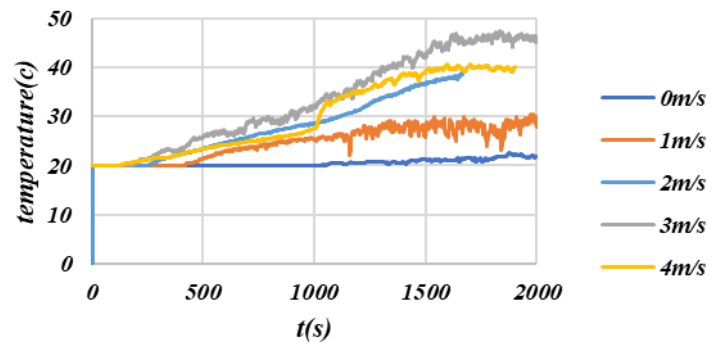


Diagram 175: Diagram of the correlation of ventilation speeds as a function of temperature at the end of time, in the escape route of the tunnel (distance 540m).

The results obtained from all the scenarios in relation to the different ventilation speeds and visibility are as follows:

Visibility of the tunnel roof

The visibility of the tunnel roof at various distances from the fire is observed from the following diagrams (Diagrams 176, 178, 179 and 180 respectively) that the increase in air velocity accelerates the dispersion of smoke, resulting in a decrease in visibility in a shorter time space. More specifically in all cases the visibility falls below 2 m / s but in case we do not have air 0 m / s it is expected to be delayed along the tunnel to reduce visibility.

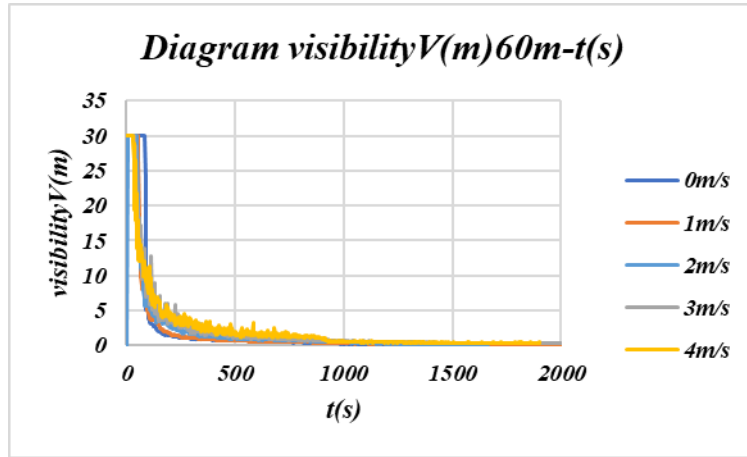


Diagram 176: Diagram of the correlation of ventilation speeds as a function of visibility at the end of time, on the roof of the tunnel (distance 60m).

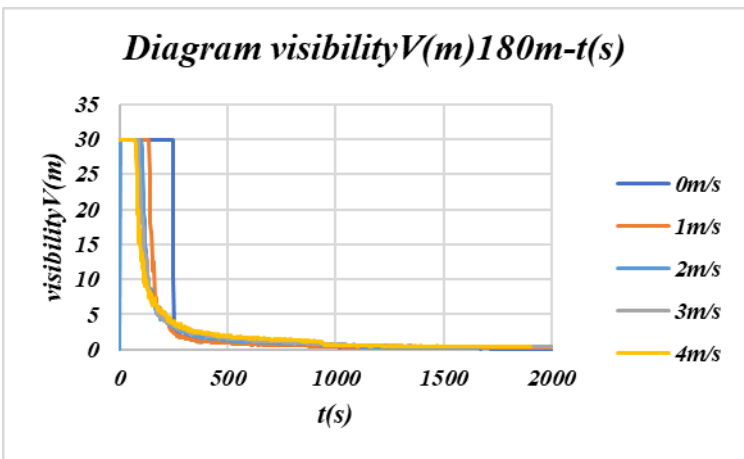


Diagram 177: Diagram of the correlation of ventilation speeds as a function of visibility at the end of time, on the roof of the tunnel (distance 180m).

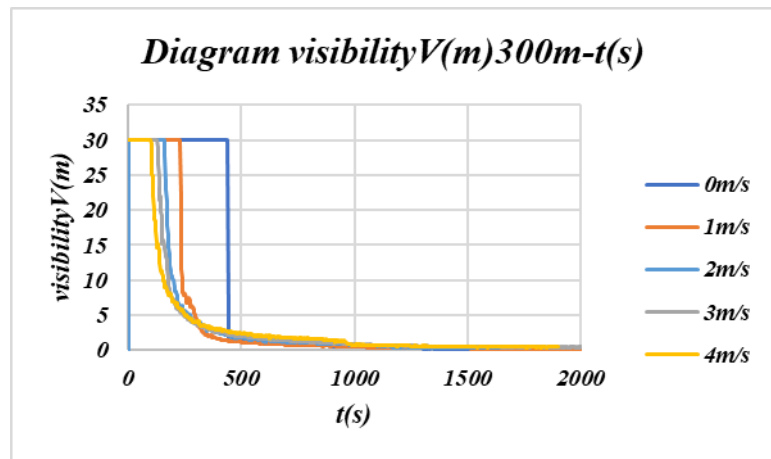


Diagram 178: Diagram of the correlation of ventilation speeds as a function of visibility over time, on the roof of the tunnel (distance 300m).

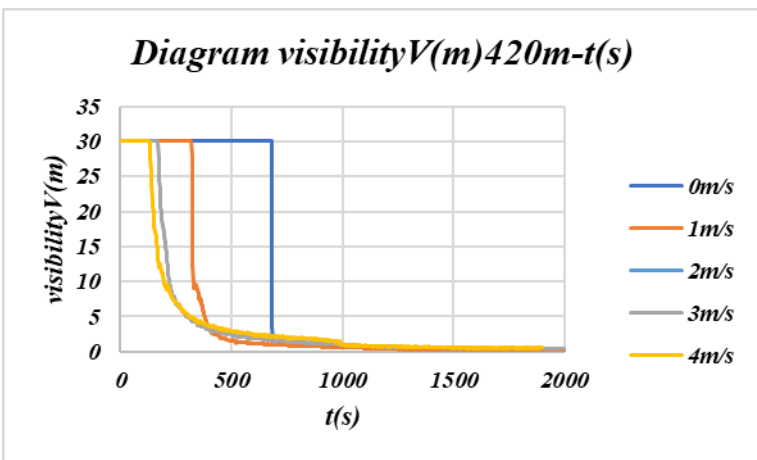


Diagram 179: Diagram of the correlation of ventilation speeds as a function of visibility at the end of time, on the roof of the tunnel (distance 420m).

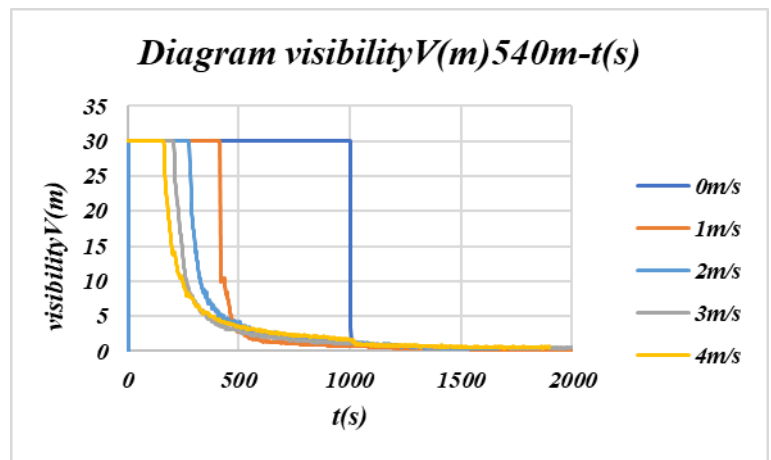


Diagram 180: Diagram of the correlation of ventilation speeds as a function of visibility over time, on the roof of the tunnel (distance 540m).

Visibility in the tunnel escape route

The visibility in the escape route of the tunnel at different distances from the fire is observed from the following diagrams (Diagrams 181, 182, 183 and 184 respectively) the increase of the air speed accelerates the dispersion of the smoke, resulting in the reduction of the visibility in a shorter time space. More specifically in all cases the visibility falls below 2 m/s but in case we do not have air 0 m/s it is expected to be delayed along the tunnel to reduce visibility.

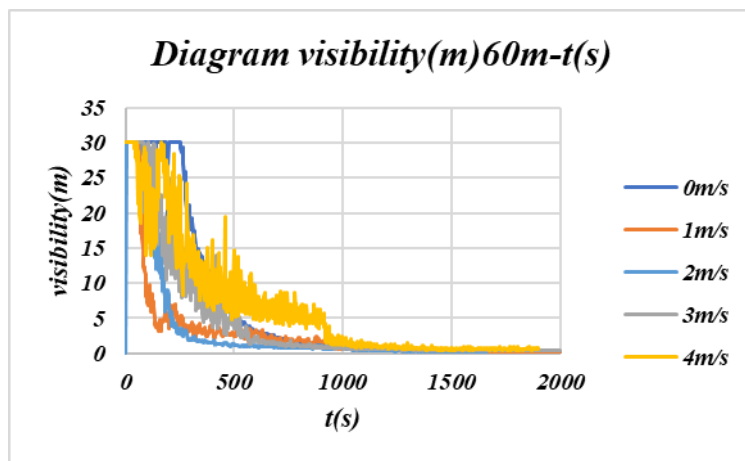


Diagram 181: Diagram of the correlation of ventilation speeds as a function of visibility at the end of time, in the escape route of the tunnel (distance 60m).

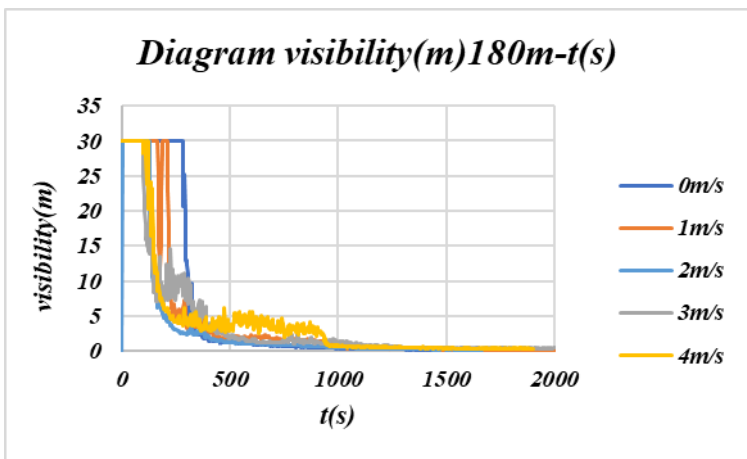


Diagram 182: Diagram of the correlation of ventilation speeds as a function of visibility over time, in the escape route of the tunnel (distance 180m).

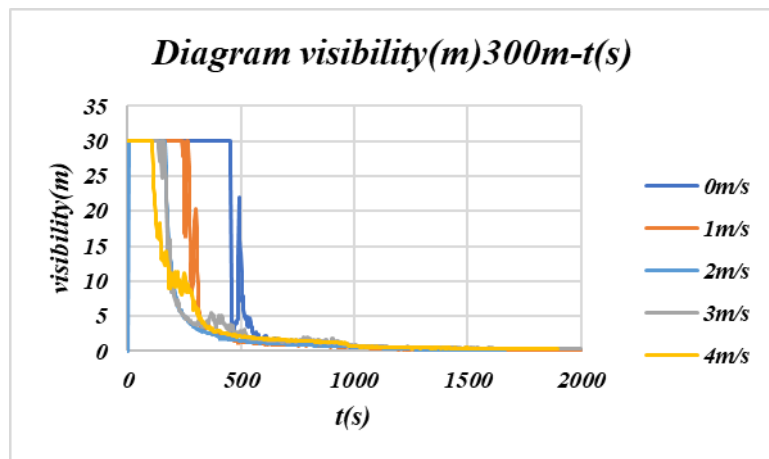


Chart 183: Diagram of the correlation of ventilation speeds as a function of visibility over time, in the escape route of the tunnel (distance 300m).

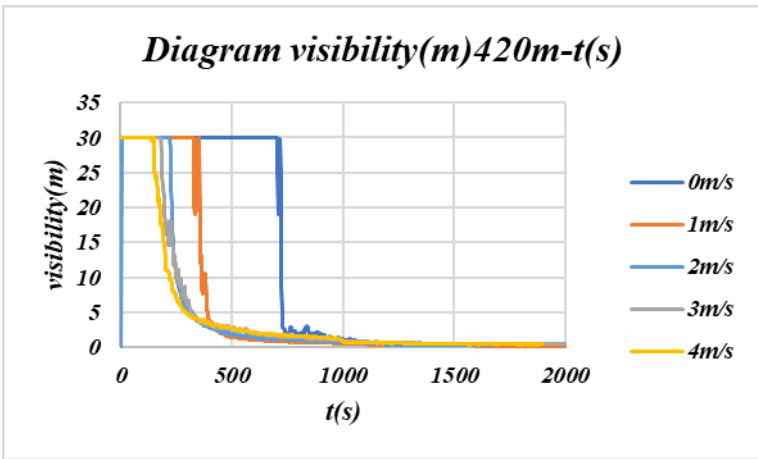


Diagram 184: Diagram of correlation of ventilation speeds as a function of visibility over time, in the escape route of the tunnel (distance 420m).

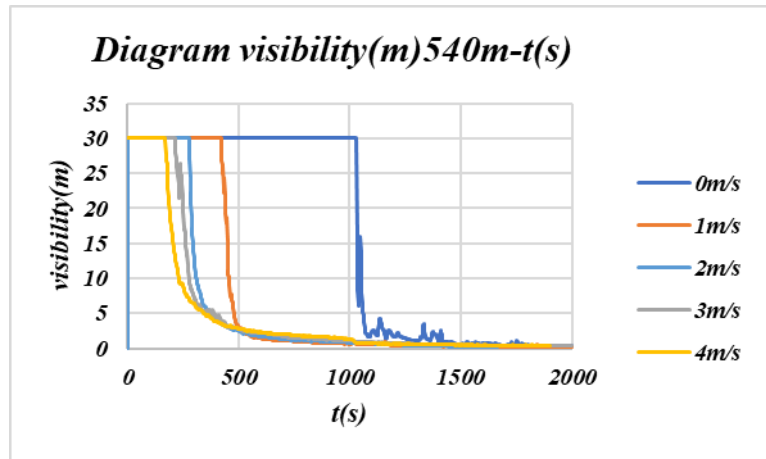


Diagram 185: Diagram of the correlation of ventilation speeds as a function of visibility over time, in the escape route of the tunnel (distance 540m).

Scenario simulation in Pathfinder

In the present study, the simulation of passenger immobilization was chosen. The characteristics of the tunnel were designed in the same way as the design of Pyrosim. The escape route was also designed. The passengers were placed in places away from the fire such as: next to the fire, 60 m, 180 m, 300 m, 420 m and 540 m.



Figure 54: Tunnel design.

Pathfinder script results

The results obtained by increasing the ventilation speed at various distances from the fire (Chart 217, 218, 219, 220 and 221 respectively) remained at values below the critical limit (FED of Toxicity <1) for 2000 s that we studied at altitude of the people.

In the diagram (Diagram 216 respectively) with 0 m when we do not have air speed near the fire the deterioration is higher because the smoke is produced next to the fire and in the other case the air speed drives it away. While at (Chart 217, 218 respectively) 60 m and 180 m the FED values are increased without speed then as we move away from the fire, we notice that the FED is growing faster because even though we have lower concentrations the smoke reaches these faster points for the Fed to rise.

Diagram 0mFED-t(s)

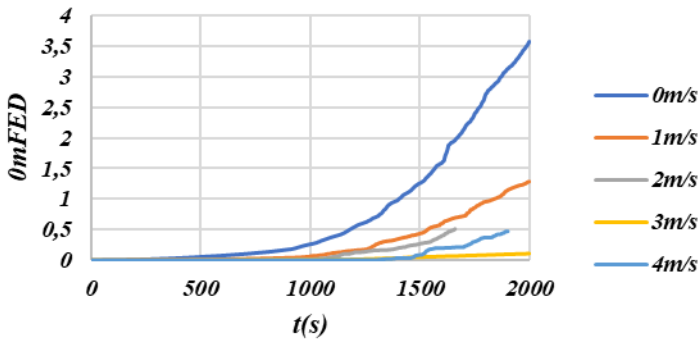


Diagram 60mFED-t(s)

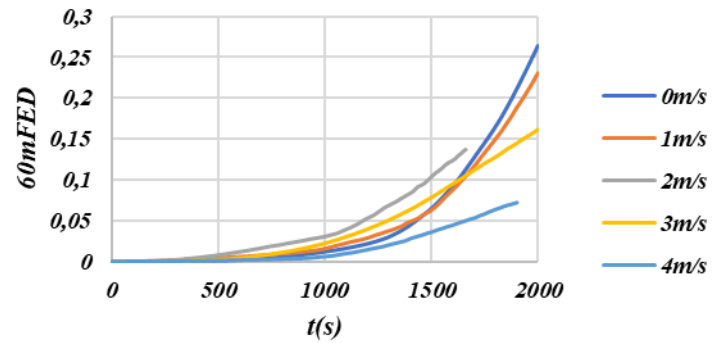


Diagram 216: Diagram of the ventilation velocities in relation to the FED of Toxicity over time, on the roof of the tunnel (distance 0m).

Diagram 217: Diagram of the ventilation velocities in relation to the FED of Toxicity over time, on the roof of the tunnel (distance 60m).

Diagram 180mFED-t(s)

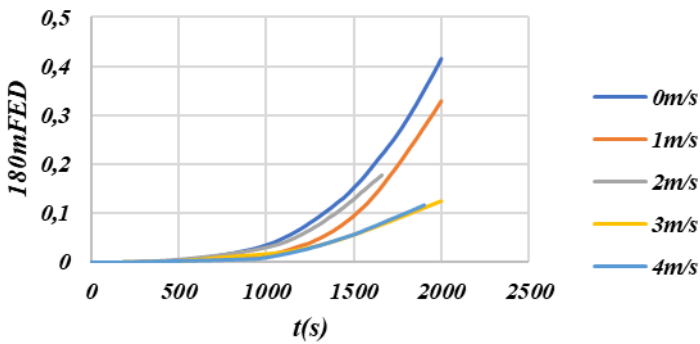


Diagram 300mFED-t(s)

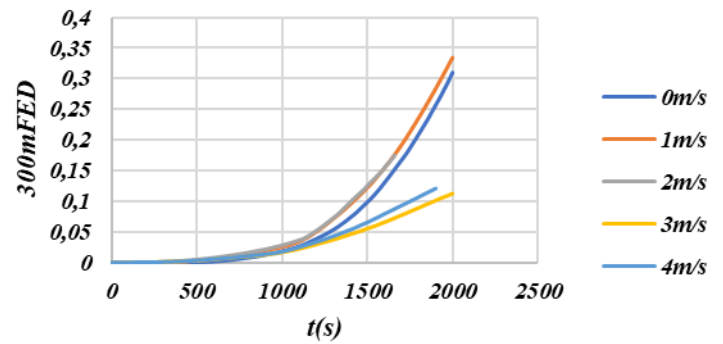


Diagram 218: Diagram of the ventilation velocities in relation to the FED of Toxicity over time, on the roof of the tunnel (distance 180m).

Diagram 219: Diagram of the ventilation velocities in relation to the FED of Toxicity over time, on the roof of the tunnel (distance 300m).

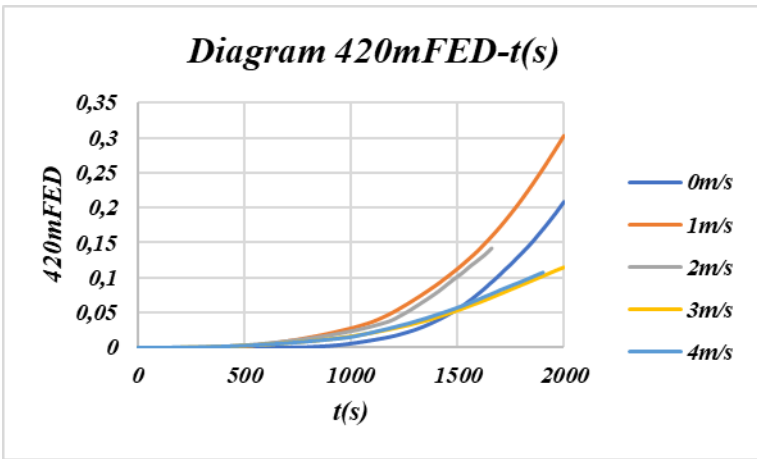


Diagram 220: Diagram of the ventilation velocities in relation to the FED of Toxicity over time, on the roof of the tunnel (distance 420m).

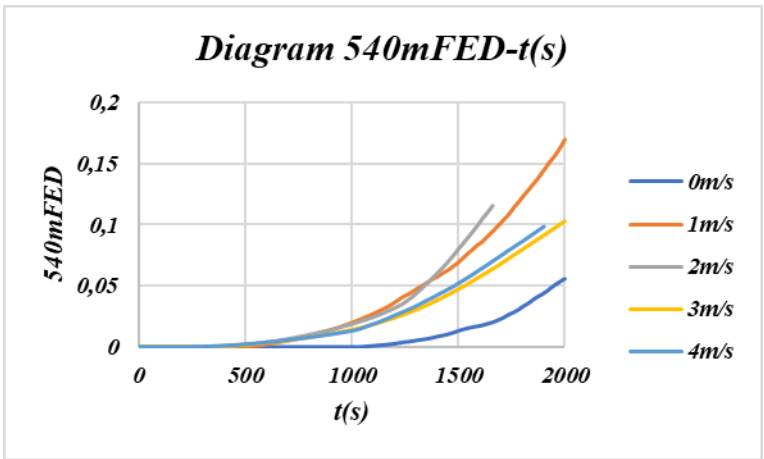


Diagram 221: Diagram of the ventilation velocities in relation to the FED of Toxicity over time, on the roof of the tunnel (distance 540m).

Conclusions

In the present study, the results obtained from the Pyrosim program are that as the air velocity increases it leads to an increase in temperature, and a decrease in CO concentration both receive maximum values faster along the tunnel. Depending on the speed of the air in the tunnel, both factors must be considered for the time being depending on the speed of the air at which the evacuation is to begin. In addition, visibility decreases faster, which means lower speed and therefore longer evacuation time, resulting in passengers remaining in poor condition.

When the air speed increases, the Pathfinder program is used to study the FED of Toxicity. From the literature data the critical mortality limit is at the value of 1. In the present study, the results obtained with the increase of air velocities, remained at values below the critical limit (FED of Toxicity <1). The regulation states that values of the ≥ 1 index cause death and that the tolerable limits are for values ≤ 0.3 because above them there is a difference problem (respiratory, sensory, etc.). So, the maximum allowable limit for the FED of Toxicity is 0.3.

Περιεχόμενα

Περίληψη	42
Abstract.....	43
Εισαγωγή	44
Κεφάλαιο 1: Γενικά χαρακτηριστικά και κίνδυνοι εκκένωσης.....	45
1.1 Κίνδυνοι σε Σιδηροδρομικές Σήραγγες	46
Κεφάλαιο 2 : Συμπεριφορά Ανθρώπων και Ατυχήματα	47
2.1 Η Ανθρώπινη Συμπεριφορά	47
2.1.1 Επιβάτες του Τρένου και του Μετρό	48
2.2 Κατανόηση της καταστροφής και μαζική συμπεριφορά εκκένωσης έκτακτης ανάγκης.....	49
2.3 Ατυχήματα.....	50
Κεφάλαιο 3: Χαρακτηριστικά φωτιάς και επιπτώσεις στον άνθρωπο	54
3.1 Χαρακτηριστικά της φωτιάς	54
3.1.1 Δυναμικά χαρακτηριστικά φωτιάς – Fire Dynamics.....	56
3.1.2 Επίπτωση της φωτιάς σε σήραγγα (εκρηκτική αποφλοίωση).....	57
3.2 Επιπτώσεις της φωτιάς στον άνθρωπο – Μέτρηση και Αξιολόγηση με χρήση δεικτών.....	59
3.2.1 Δηλητηρίαση λόγω επικίνδυνων τοξικών αερίων (Τοξικότητα).....	60
3.2 Ρεύματα θερμότητας (λόγω συναγωγής και ακτινοβολίας).....	63
3.3.1 Δείκτης FEC.....	66
3.3.2 Ταχύτητα κίνησης χρηστών βάση της ορατότητάς τους.....	67
3.4 Αερισμός	69
3.4.1 Κρίσιμη ταχύτητα.....	69
3.4.2 Backlayering.....	70
3.4.3 Έγκαιρη εκκένωση - Νομοθεσία	71
Κεφάλαιο 4 : Προσομοίωση σεναρίων στο Pyrosim.....	75
4.1 Σχεδιασμός και χαρακτηριστικά σήραγγας.....	76
4.2 Σενάρια.....	80
4.2.1 Σενάριο 1.....	80
4.2.2 Σενάριο 2.....	90
4.2.3 Σενάριο 3.....	100
4.2.4 Σενάριο 4.....	110

4.2.5 Σενάριο 5.....	120
4.3 Αποτελέσματα σεναρίων Pyrosim	130
Κεφάλαιο 5 : Προσομοίωση σεναρίων στο Pathfinder	140
5.1 Σχεδιασμός σήραγγας	141
5.2.1 Σενάριο 1.....	141
5.2.2 Σενάριο 2.....	143
5.2.3 Σενάριο 3.....	144
5.2.4 Σενάριο 4.....	145
5.2.5 Σενάριο 5.....	147
5.3 Αποτελέσματα σεναρίων Pathfinder	148
Συμπεράσματα.....	151
Βιβλιογραφία	153

Ευρετήριο εικόνων

Εικόνα 1: Η εικόνα δείχνει την έναρξη της φωτιάς στις κυλιόμενες σκάλες του σταθμού του μετρό King's Cross (http://www.nationalarchives.gov.uk/doc/open-government-licence/open-government-licence.htm).....	52
Εικόνα 2: Τα τρία στοιχεία που αποτελούν την φωτιά (“File:Fire triangle EL.svg - Wikimedia Commons,” n.d.).....	55
Εικόνα 3: Στάδια κατά τη διάρκεια της φωτιάς (“HSE Professionals : Fire Stages & Fire Types?,” n.d.).....	56
Εικόνα 4: Μήκος backlayering σε πυρκαγιά σήραγγας κατά τον διαμήκη εξαερισμό (Haddad et al., 2019).....	71
Εικόνα 5: Σχηματικά διαγράμματα της κρίσιμης ταχύτητας για την επίστρωση καπνού. (α) η επίστρωση πίσω γίνεται κάτω από ασθενή αερισμό και (β) ο καπνός παραμένει στη μία πλευρά της φωτιάς υπό ισχυρό αερισμό.....	71
Εικόνα 6: Σχεδιασμός σήραγγας.....	76
Εικόνα 7: Τοποθέτηση devices στην όδευση διαφυγής και στο κέντρο κάτω από την οροφή της σήραγγας.	78
Εικόνα 8: Εισαγωγή διάφορων θέσεων 2D slices.....	79
Εικόνα 9: SLICES για το μονοξείδιο του άνθρακα σε χρόνο 900 sec.....	81
Εικόνα 10: SLICES για το μονοξείδιο του άνθρακα σε χρόνο 1300 sec.....	81
Εικόνα 11: SLICES για το μονοξείδιο του άνθρακα σε χρόνο 1600 sec.....	81
Εικόνα 12: SLICES για τη θερμοκρασία σε χρόνο 900 sec.	82
Εικόνα 13: SLICES για τη θερμοκρασία σε χρόνο 1300 sec.	82
Εικόνα 14: SLICES για τη θερμοκρασία σε χρόνο 1600 sec	82
Εικόνα 15: SLICES για την ορατότητα σε χρόνο 90sec.	83
Εικόνα 16: SLICES για την ορατότητα σε χρόνο 180sec.	83
Εικόνα 17: SLICES για την ορατότητα σε χρόνο 260sec.	83
Εικόνα 18: SLICES για το μονοξείδιο του άνθρακα σε χρόνο 900 sec.....	91

Εικόνα 19: SLICES για το μονοξειδίο του άνθρακα σε χρόνο 1300 sec.....	91
Εικόνα 20: SLICES για το μονοξειδίο του άνθρακα σε χρόνο 1600 sec.....	91
Εικόνα 21: SLICES για τη θερμοκρασία σε χρόνο 900 sec.	92
Εικόνα 22: SLICES για τη θερμοκρασία σε χρόνο 1300 sec.	92
Εικόνα 23: SLICES για τη θερμοκρασία σε χρόνο 1600 sec.	92
Εικόνα 24: SLICES για την ορατότητα σε χρόνο 90sec.	93
Εικόνα 25: SLICES για την ορατότητα σε χρόνο 120sec.	93
Εικόνα 26: SLICES για την ορατότητα σε χρόνο 280sec.	93
Εικόνα 27: SLICES για το μονοξειδίο του άνθρακα σε χρόνο 900 sec.....	101
Εικόνα 28:: SLICES για το μονοξειδίο του άνθρακα σε χρόνο 1300 sec.....	101
Εικόνα 29:: SLICES για το μονοξειδίο του άνθρακα σε χρόνο 1600 sec.....	101
Εικόνα 30: SLICES για τη θερμοκρασία σε χρόνο 900 sec.	102
Εικόνα 31: SLICES για τη θερμοκρασία σε χρόνο 1300 sec.	102
Εικόνα 32: SLICES για τη θερμοκρασία σε χρόνο 1600 sec.	102
Εικόνα 33: SLICES για την ορατότητα σε χρόνο 90sec	103
Εικόνα 34: SLICES για την ορατότητα σε χρόνο 120sec	103
Εικόνα 35: SLICES για την ορατότητα σε χρόνο 280sec	103
Εικόνα 36: SLICES για το μονοξειδίο του άνθρακα σε χρόνο 900 sec.....	111
Εικόνα 37:: SLICES για το μονοξειδίο του άνθρακα σε χρόνο 1300 sec.....	111
Εικόνα 38:: SLICES για το μονοξειδίο του άνθρακα σε χρόνο 1600 sec.....	111
Εικόνα 39: SLICES για τη θερμοκρασία σε χρόνο 900 sec.	112
Εικόνα 40: SLICES για τη θερμοκρασία σε χρόνο 1300 sec.	112
Εικόνα 41: SLICES για τη θερμοκρασία σε χρόνο 1600 sec.	112
Εικόνα 42: SLICES για την ορατότητα σε χρόνο 90sec	113
Εικόνα 43: SLICES για την ορατότητα σε χρόνο 120sec	113
Εικόνα 44: SLICES για την ορατότητα σε χρόνο 280sec	113
Εικόνα 45: SLICES για το μονοξειδίο του άνθρακα σε χρόνο 900 sec.....	121
Εικόνα 46:: SLICES για το μονοξειδίο του άνθρακα σε χρόνο 1300 sec.....	121
Εικόνα 47:: SLICES για το μονοξειδίο του άνθρακα σε χρόνο 1600 sec.....	121
Εικόνα 48: SLICES για τη θερμοκρασία σε χρόνο 900 sec.	122
Εικόνα 49: SLICES για τη θερμοκρασία σε χρόνο 1300 sec.	122
Εικόνα 50: SLICES για τη θερμοκρασία σε χρόνο 1600 sec.	122
Εικόνα 51: SLICES για την ορατότητα σε χρόνο 90sec	123
Εικόνα 52: SLICES για την ορατότητα σε χρόνο 120sec	123
Εικόνα 53: SLICES για την ορατότητα σε χρόνο 280sec	123
Εικόνα 54: Σχεδιασμός σήραγγας.....	141

Ευρετήριο πινάκων

Πίνακας 1: Συμπεριφορά του σκυροδέματος σε υψηλές θερμοκρασίες (Poronics 1992).	58
Πίνακας 2: Τιμές των σταθερών K και D ανάλογα με τη δραστηριότητα του ανθρώπου (Purser, 2002).	61
Πίνακας 3: Ενδεικτικά όρια αντοχής σε συγκέντρωσης μονοξειδίου του άνθρακα (AFAC, 2010).....	62

Πίνακας 4: Ενδεικτικά όρια αντοχής σε συγκέντρωση μονοξειδίου του άνθρακα (engineeringtoolbox.com).....	63
Πίνακας 5: Τιμές των K1 και K2 ανάλογα τον τύπο του ρουχισμού (P. Raj, 2008).....	65
Πίνακας 6: Ενδεικτικά όρια αντοχής σε διάφορες θερμοκρασίες (AFAC,2010).	65
Πίνακας 7: Χρόνοι ανοχής σε διάφορες ροές ακτινοβολίας και θερμοκρασίες αέρα (SFPE, 2016).	66
Πίνακας 8: Παράγοντες που θα πρέπει να ληφθούν υπόψη για τη διατήρηση ενός περιβάλλοντος με βιωσιμότητα για περιόδους μικρής διάρκειας (Ventilation, 2015). ...	75
Πίνακας 9: Χαρακτηριστικά σεναρίων	80

Ευρετήριο διαγραμμάτων

Διάγραμμα 1: Συσχέτιση της ορατότητας (visibility) με το συντελεστή εξάλειψης (extinction coefficient) (FIT 2015).	67
Διάγραμμα 2: Ταχύτητα κίνησης βάση πυκνότητας καπνού (FIT 2015).....	68
Διάγραμμα 3: Ταχύτητα κίνησης βάση πυκνότητας καπνού (SFPE, 2016).....	68
Διάγραμμα 4: Ταχύτητα κίνησης βάση ορατότητας σε ερεθιστικό καπνό.	68
Διάγραμμα 5: Παραγωγή θερμότητας φωτιάς βάση χρόνου.	77
Διάγραμμα 6: Διάγραμμα μονοξειδίου του άνθρακα σε συνάρτηση με το χρόνο, στην οροφή της σήραγγας (απόσταση 60 m).	84
Διάγραμμα 7: Διάγραμμα μονοξειδίου του άνθρακα σε συνάρτηση με το χρόνο, στην όδευση διαφυγής της σήραγγας (απόσταση 60 m).....	84
Διάγραμμα 8: Διάγραμμα θερμοκρασίας σε συνάρτηση με το χρόνο, στην οροφή της σήραγγας (απόσταση 60 m).	84
Διάγραμμα 9: Διάγραμμα θερμοκρασίας σε συνάρτηση με το χρόνο, στην όδευση διαφυγής της σήραγγας (απόσταση 60 m).....	84
Διάγραμμα 10: Διάγραμμα ορατότητας σε συνάρτηση με το χρόνο, στην οροφή της σήραγγας (απόσταση 60 m).....	84
Διάγραμμα 11: Διάγραμμα ορατότητας σε συνάρτηση με το χρόνο, στην όδευση διαφυγής της σήραγγας (απόσταση 60 m).....	84
Διάγραμμα 12: Διάγραμμα μονοξειδίου του άνθρακα σε συνάρτηση με το χρόνο, στην οροφή της σήραγγας (απόσταση 180 m).	85
Διάγραμμα 13: Διάγραμμα μονοξειδίου του άνθρακα σε συνάρτηση με το χρόνο, στην όδευση διαφυγής της σήραγγας (απόσταση 180 m).....	85
Διάγραμμα 14: Διάγραμμα θερμοκρασίας σε συνάρτηση με το χρόνο, στην οροφή της σήραγγας (απόσταση 180 m).	85
Διάγραμμα 15: Διάγραμμα θερμοκρασίας σε συνάρτηση με το χρόνο, στην όδευση διαφυγής της σήραγγας (απόσταση 180 m).....	85
Διάγραμμα 16: Διάγραμμα ορατότητας σε συνάρτηση με το χρόνο, στην οροφή της σήραγγας (απόσταση 180 m).....	86
Διάγραμμα 17: Διάγραμμα ορατότητας σε συνάρτηση με το χρόνο, στην όδευση διαφυγής της σήραγγας (απόσταση 180 m).....	86
Διάγραμμα 18: Διάγραμμα μονοξειδίου του άνθρακα σε συνάρτηση με το χρόνο, στην οροφή της σήραγγας (απόσταση 300 m).	86
Διάγραμμα 19: Διάγραμμα μονοξειδίου του άνθρακα σε συνάρτηση με το χρόνο, στην όδευση διαφυγής της σήραγγας (απόσταση 300 m).....	86

Διάγραμμα 135: Διάγραμμα θερμοκρασίας σε συνάρτηση με το χρόνο, στην όδευση διαφυγής της σήραγγας (απόσταση 180m).....	125
Διάγραμμα 136: Διάγραμμα ορατότητας σε συνάρτηση με το χρόνο, στην οροφή της σήραγγας (απόσταση 180m).	126
Διάγραμμα 137: Διάγραμμα ορατότητας σε συνάρτηση με το χρόνο, στην όδευση διαφυγής της σήραγγας (απόσταση 180m).	126
Διάγραμμα 138: Διάγραμμα μονοξειδίου του άνθρακα σε συνάρτηση με το χρόνο, στην οροφή της σήραγγας (απόσταση 300m).	126
Διάγραμμα 139: Διάγραμμα μονοξειδίου του άνθρακα σε συνάρτηση με το χρόνο, στην όδευση διαφυγής της σήραγγας (απόσταση 300m).....	126
Διάγραμμα 140: Διάγραμμα θερμοκρασίας σε συνάρτηση με το χρόνο, στην οροφή της σήραγγας	127
Διάγραμμα 141: Διάγραμμα θερμοκρασίας σε συνάρτηση με το χρόνο, στην όδευση διαφυγής της σήραγγας (απόσταση 300m).....	127
Διάγραμμα 142: Διάγραμμα ορατότητας σε συνάρτηση με το χρόνο, στην οροφή της σήραγγας (απόσταση 300m).	127
Διάγραμμα 143: Διάγραμμα ορατότητας σε συνάρτηση με το χρόνο, στην όδευση διαφυγής της σήραγγας (απόσταση 300m).	127
Διάγραμμα 144: Διάγραμμα μονοξειδίου του άνθρακα σε συνάρτηση με το χρόνο, στην οροφή της σήραγγας (απόσταση 420m).	128
Διάγραμμα 145: Διάγραμμα μονοξειδίου του άνθρακα σε συνάρτηση με το χρόνο, στην όδευση διαφυγής της σήραγγας (απόσταση 420m).....	128
Διάγραμμα 146: Διάγραμμα θερμοκρασίας σε συνάρτηση με το χρόνο, στην οροφή της σήραγγας (απόσταση 420m).	128
Διάγραμμα 147: Διάγραμμα θερμοκρασίας σε συνάρτηση με το χρόνο, στην όδευση διαφυγής της σήραγγας (απόσταση 420m).....	128
Διάγραμμα 148: Διάγραμμα ορατότητας σε συνάρτηση με το χρόνο, στην οροφή της σήραγγας (απόσταση 420m).	129
Διάγραμμα 149: Διάγραμμα ορατότητας σε συνάρτηση με το χρόνο, στην όδευση διαφυγής της σήραγγας (απόσταση 420m).	129
Διάγραμμα 150: Διάγραμμα μονοξειδίου του άνθρακα σε συνάρτηση με το χρόνο, στην οροφή της σήραγγας (απόσταση 540m).	129
Διάγραμμα 151: Διάγραμμα μονοξειδίου του άνθρακα σε συνάρτηση με το χρόνο, στην όδευση διαφυγής της σήραγγας (απόσταση 540m).....	129
Διάγραμμα 152: Διάγραμμα θερμοκρασίας σε συνάρτηση με το χρόνο, στην οροφή της σήραγγας (απόσταση 540m).	130
Διάγραμμα 153: Διάγραμμα θερμοκρασίας σε συνάρτηση με το χρόνο, στην όδευση διαφυγής της σήραγγας (απόσταση 540m).....	130
Διάγραμμα 154: Διάγραμμα ορατότητας σε συνάρτηση με το χρόνο, στην οροφή της σήραγγας (απόσταση 540m).	130
Διάγραμμα 155: Διάγραμμα ορατότητας σε συνάρτηση με το χρόνο, στην όδευση διαφυγής της σήραγγας (απόσταση 540m).	130
Διάγραμμα 156: Διάγραμμα συσχέτισης ταχυτήτων του αέρα σε συνάρτηση με το μονοξείδιο του άνθρακα κατά το πέρας του χρόνου, στην οροφή της σήραγγας (απόσταση 60m).	131

Διάγραμμα 211: Διάγραμμα FED of Toxicity σε συνάρτηση με τον χρόνο (απόσταση 60 m).	147
Διάγραμμα 212: Διάγραμμα FED of Toxicity σε συνάρτηση με τον χρόνο (απόσταση 180 m).	147
Διάγραμμα 213: Διάγραμμα FED of Toxicity σε συνάρτηση με τον χρόνο (απόσταση 300 m).	147
Διάγραμμα 214: Διάγραμμα FED of Toxicity σε συνάρτηση με τον χρόνο (απόσταση 420 m).	148
Διάγραμμα 215: Διάγραμμα FED of Toxicity σε συνάρτηση με τον χρόνο (απόσταση 540 m).	148
Διάγραμμα 216: Διάγραμμα συσχέτισης ταχυτήτων του αέρα σε συνάρτηση με το FED of Toxicity κατά το πέρας του χρόνου, στην οροφή της σήραγγας (απόσταση 0m).	149
Διάγραμμα 217: Διάγραμμα συσχέτισης ταχυτήτων του αέρα σε συνάρτηση με το FED of Toxicity κατά το πέρας του χρόνου, στην οροφή της σήραγγας (απόσταση 60m).	149
Διάγραμμα 218: Διάγραμμα συσχέτισης ταχυτήτων του αέρα σε συνάρτηση με το FED of Toxicity κατά το πέρας του χρόνου, στην οροφή της σήραγγας (απόσταση 180m).	149
Διάγραμμα 219: Διάγραμμα συσχέτισης ταχυτήτων του αέρα σε συνάρτηση με το FED of Toxicity κατά το πέρας του χρόνου, στην οροφή της σήραγγας (απόσταση 300m).	149
Διάγραμμα 220: Διάγραμμα συσχέτισης ταχυτήτων του αέρα σε συνάρτηση με το FED of Toxicity κατά το πέρας του χρόνου, στην οροφή της σήραγγας (απόσταση 420m).	150
Διάγραμμα 221: Διάγραμμα συσχέτισης ταχυτήτων του αέρα σε συνάρτηση με το FED of Toxicity κατά το πέρας του χρόνου, στην οροφή της σήραγγας (απόσταση 540m).	150

Περίληψη

Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι η μελέτη επίδρασης της ταχύτητας του αέρα εντός σιδηροδρομικής σήραγγας στην υγεία των επιβατών σε περίπτωση εκδήλωσης πυρκαγιάς. Για την καλύτερη κατανόηση της εκκένωσης και της υγεία των επιβατών χρησιμοποιούνται συγκεκριμένα μοντέλα προσομοίωσης. Στη συνέχεια, προσδιορίζονται διάφορα σενάρια φωτιάς σε σιδηροδρομική σήραγγα 1200 m και η επίπτωση των προϊόντων της καύσης στον άνθρωπο. Ακολούθως, εκτελούνται κάποιες αναλύσεις για την εξάπλωση της φωτιάς και των προϊόντων της στο συγκεκριμένο υπόγειο χώρο με τη βοήθεια του λογισμικού προσομοίωσης Pyrosim. Έπειτα, πραγματοποιούνται προσομοιώσεις για την εκκένωση του χώρου με το πρόγραμμα Pathfinder χρησιμοποιώντας πάντα τα αποτελέσματα των αναλύσεων του Pyrosim για κάθε διαφορετικό σενάριο. Τα αποτελέσματα του προγράμματος δυναμικής προσομοίωσης φωτιάς εισάγονται στο πρόγραμμα εκκένωσης, ώστε να εξεταστεί η επιρροή των σεναρίων φωτιάς στο χρόνο εκκένωσης. Τέλος, λαμβάνονται υπόψη ο δείκτης FED of Toxicity από τη διαδικασία της εκκένωσης βάσει των χρόνων της, οι οποίοι δείχνουν πως επηρεάζεται η υγεία των χρηστών του σταθμού κατά τη διάρκειά της εκκένωσης.

Ενδεικτικά, τα αποτελέσματα που προκύπτουν από το πρόγραμμα Pyrosim είναι ότι με την αύξηση ταχύτητας του αέρα οδηγεί σε αύξησή της θερμοκρασίας, και μείωση της συγκέντρωσης του CO και τα δυο λαμβάνουν μέγιστες τιμές πιο γρήγορα κατά μήκος της σήραγγας. Ανάλογα με την ταχύτητα του αέρα που υπάρχει μέσα στη σήραγγα πρέπει να ληφθούν υπόψη και οι δυο παράγοντες για την χρονική στιγμή ανάλογα με τη ταχύτητα αέρα που πρέπει να ξεκινήσει η εκκένωση. Επιπλέον, μειώνεται γρηγορότερα η ορατότητα το οποίο σημαίνει μικρότερη ταχύτητα άρα και μεγαλύτερος χρόνος εκκένωσης με αποτέλεσμα οι επιβάτες να παραμείνουν σε κακές συνθήκες. Στη συνέχεια με την αύξηση της ταχύτητας του αέρα γίνεται η χρήση του προγράμματος Pathfinder για την μελέτη του FED of Toxicity. Από τα βιβλιογραφικά δεδομένα το κρίσιμο όριο θνησιμότητας βρίσκεται στην τιμή του 1. Στην παρούσα μελέτη, τα αποτελέσματα που προέκυψαν με την αύξηση της ταχυτήτων του αέρα, παρέμειναν σε τιμές μικρότερες του κρίσιμου ορίου ($FED\ of\ Toxicity < 1$). Ο κανονισμός αναφέρει ότι τιμές του δείκτη ≥ 1 επιφέρουν θάνατο και ότι τα ανεκτά όρια είναι για τιμές $\leq 0,3$ γιατί πάνω από αυτές παρουσιάζονται διαφορά πρόβλημα (αναπνευστικά, αισθήσεων κ.α.). Άρα ως μέγιστο επιτρεπτό όριο για το δείκτη FED of Toxicity τίθεται η τιμή 0,3.

Abstract

The purpose of this work is to study the effect of air velocity inside a railway tunnel on the health of passengers in the event of fire. Specific simulation models are used to better understand evacuation and occupant health. Next, various fire scenarios in a 1200 m railway tunnel and the impact of combustion products on humans are identified. Then, analyzes are performed for the spread of the fire and its products in the specific underground space with the help of the Pyrosim simulation software. The evacuation simulations are performed with the Pathfinder program, using the results of the Pyrosim analyzes for each different scenario. The results of the dynamic fire simulation program are entered into the evacuation program to examine the influence of fire scenarios on evacuation time. Finally, the FED of Toxicity index is considered from the evacuation process based on its times, which show how the health of the station users is affected during the evacuation.

Indicatively, the results obtained from the Pyrosim program are that with increasing air velocity leads to an increase in temperature, and a decrease in CO concentration both receive maximum values faster along the tunnel. Depending on the speed of the air in the tunnel, both factors must be considered for the time being depending on the speed of the air at which the evacuation is to begin. In addition, visibility decreases faster, which means lower speed and therefore longer evacuation time, resulting in passengers remaining in poor condition.

Then, as the air speed increases, the Pathfinder program is used to study the FED of Toxicity. From the literature data the critical mortality limit is at the value of 1. In the present study, the results obtained with the increase of air velocities, remained at values below the critical limit (FED of Toxicity <1). The regulation states that values of the ≥ 1 index cause death and that the tolerable limits are for values ≤ 0.3 because above them there is a difference problem (respiratory, sensory, etc.). So, the maximum allowable limit for the FED of Toxicity is 0.3.

Εισαγωγή

Τα υπόγεια έργα είναι μια επιστήμη, η οποία εξελίσσεται συνεχώς και σε γρήγορους ρυθμούς λόγω της έντονης αστικοποίησης, της αύξησης του πληθυσμού και των τεχνολογικών απαιτήσεων που επιβάλλει η σύγχρονη εποχή. Στις μέρες μας, η εξυπηρέτηση των αναγκών του πληθυσμού καθιστά το σχεδιασμό των υπογείων έργων σημαντικό παράγοντα για τη διασφάλισή τους. Το πρωταρχικό μέλημα σε ένα σχεδιασμό ενός υπόγειου έργου είναι η ασφάλεια των ατόμων που συμμετέχουν σε αυτό, καθώς και μετέπειτα στη χρήση του. Η ασφάλεια παρέχεται σύμφωνα με τις νομοθετικές και κανονιστικές διατάξεις που υφίστανται. Μια βασική στρατηγική αντιμετώπισης καταστάσεων έκτακτης ανάγκης για την ασφάλεια των ανθρώπων είναι η εκκένωση.

Εκκένωση ονομάζεται μια διαδικασία με επείγοντα χαρακτήρα που έπεται ενός γεγονότος εκτάκτου ανάγκης (πυρκαγιά, σεισμός, πλημμύρα, κατάρρευση των επικοινωνιών, ραδιενεργό ατύχημα, έκρηξη κτλ.) και προβλέπει την άμεση απομάκρυνση του πληθυσμού από το υπόγειο έργο (μετρό, οδική σήραγγα κτλ.) και τη μετάβαση αυτών σε απόσταση ασφαλείας. Η αποτελεσματικότητα της εκκένωσης εξαρτάται κατά μεγάλο ποσοστό από τον προγραμματισμό και από τον προληπτικό σχεδιασμό της. Επίσης υπάρχουν παράγοντες που επηρεάζουν την εκκένωση και την υγεία των επιβατών με σημαντικότερους τα προϊόντα της φωτιάς (καπνός, συγκεντρώσεις τοξικών αερίων, υψηλές θερμοκρασίας κτλ.) τα οποία χρήζουν ιδιαίτερης μελέτης για το πώς επηρεάζουν και τρόπους περιορισμού.

Για την καλύτερη κατανόηση της εκκένωσης και την υγεία των επιβατών χρησιμοποιούνται συγκεκριμένα μοντέλα προσομοίωσης. Ένα μοντέλο προσομοίωσης για την κατανόηση της φωτιάς στην ανθρώπινη υγεία είναι το πρόγραμμα PyroSim έχει γραφικό περιβάλλον για τον χρήστη (Graphical User Interface), το οποίο τρέχει το πρόγραμμα FDS (Fire Dynamics Simulator), δίνοντας έτσι την δυνατότητα να προβλεφθούν οι συγκεντρώσεις του καπνού, του μονοξειδίου του άνθρακα (CO) και

άλλων ουσιών κατά την διάρκεια μιας πυρκαγιάς, όπως επίσης και τα προφίλ των θερμοκρασιών για έναν χώρο.

Όπως και για την εκκένωση είναι το πρόγραμμα Pathfinder. Με το συγκεκριμένο πρόγραμμα δίνεται η δυνατότητα πολλών παραμετρικών αναλύσεων διαφοροποιώντας κάθε φορά διάφορους συντελεστές, όπως ο αριθμός των χρηστών, ο αριθμός των εξόδων, η ταχύτητα κίνησης και άλλες συνθήκες συμπεριφοράς. Επίσης στις λειτουργίες του λογισμικού προσομοίωσης είναι η δυνατότητα της παρουσίασης της ζωντανής κίνησης των χρηστών με ανθρώπινη μορφή.

Κεφάλαιο 1: Γενικά χαρακτηριστικά και κίνδυνοι εκκένωσης

Γενικά

Το σχέδιο εκκένωσης αποτελεί την έγκαιρη και οργανωμένη απόσπαση του πληθυσμού, από την περιοχή εμφάνισης ενός περιστατικού υψηλού κινδύνου. Πρόκειται για έναν αποτελεσματικό τρόπο μείωσης των επιπτώσεων και συνεπώς του συνολικού κινδύνου (OSHA, 2001). Σε περίπτωση πυρκαγιάς, μια άμεση εκκένωση μπορεί να είναι αναγκαία ακόμα και αν η συγκεκριμένη περιοχή βρίσκεται εκτός ορίων του σχεδίου, ενώ σε μία ανοργάνωτη διαδικασία εκκένωσης ο απαιτούμενος χρόνος εκκένωσης αυξάνεται και συνεπώς θα προκύψουν τα εξής ατυχήματα:

- Εγκλωβισμοί
- Τραυματισμοί
- Υλικές ζημιές.

Τύποι εκκένωσης

Οι τύποι εκκένωσης εξαρτώνται από τον τρόπο εκτέλεσης της εκκένωσης καθώς και τον χρόνο εκκένωσης. Οι χρονικοί τύποι εκκένωσης διαχωρίζονται σε άμεσες και προειδοποιημένες εκκενώσεις, ενώ αυτοί που εξαρτώνται από τον τρόπο εκτέλεσης της εκκένωσης είναι η μερική και η πλήρης εκκένωση (Αναστάσιος Κ. Καλλιανιώτης, 2015). Παρακάτω αναλύονται οι διάφοροι τύποι εκκένωσης.

Χρονικοί τύποι εκκένωσης

Άμεση εκκένωση: Σε περίπτωση ατυχήματος απαιτείται η άμεση εκκένωση, η οποία συνεπάγεται της άμεσης αντίδρασης. Έτσι, επιτρέπεται η μικρή ή καθόλου προειδοποίηση με το διαθέσιμο χρόνο προετοιμασίας να είναι περιορισμένος. Παραδείγματα αυτού του τύπου γεγονότων είναι η εκδήλωση ανεξέλεγκτης φωτιάς, η διαρροή επικίνδυνων υλικών, ο σεισμός κα.

Προειδοποιημένη εκκένωση: Σε αντίθεση με την άμεση εκκένωση, η προειδοποιημένη εκκένωση χαρακτηρίζεται από ένα γεγονός στο οποίο έχει προηγηθεί κάποια προειδοποίηση. Καταστάσεις που απαιτούν τέτοια αντίδραση για εκκένωση είναι η είναι κυρίως τα ακραία καιρικά φαινόμενα όπως πλημμύρες, κυκλώνες και άλλα.

Τρόποι εκτέλεσης εκκένωσης

Μερική εκκένωση: Στη μερική εκκένωση, όπου η ασφάλεια των παρευρισκόμενων μπορεί να τεθεί σε κίνδυνο εξαιτίας του γεγονότος, οφείλουν να μετακινούνται από την απειλούμενη ζώνη σε μία προστατευμένη περιοχή που μπορεί να βρίσκεται εντός ή εκτός της εγκατάστασης (Gustin, J. F., 2007).

Πλήρης εκκένωση: Σε μία πλήρη εκκένωση, οι παρευρισκόμενοι απαιτείται να εκκενώσουν τον χώρο στον οποίο βρίσκονται. Σε κάποιες περιπτώσεις τα μέλη της ομάδας παραμένουν για να διασφαλίσουν ότι όλοι οι παρευρισκόμενοι έχουν εγκαταλείψει το χώρο ή να διασφαλίσουν τις λειτουργίες του χώρου και τις κρίσιμες περιοχές (Gustin, J. F., 2007).

1.1 Κίνδυνοι σε Σιδηροδρομικές Σήραγγες

Η πυρκαγιά, η εκλυόμενη θερμότητα και ο καπνός αποτελούν σοβαρή περίπτωση ατυχήματος στη σήραγγα. Σε περίπτωση που η φωτιά που έχει ξεσπάσει σε τρένο δεν μπορεί να σβήσει, οι επιβάτες πρέπει να απομακρυνθούν αφού το τρένο σταματήσει. Για να γίνει αυτό, απαιτούνται ευνοϊκές συνθήκες, οι οποίες παρατηρούνται σε ειδικούς σταθμούς έκτακτης ανάγκης. Ο τοξικός καπνός που απελευθερώνεται από την πυρκαγιά θεωρείται σπουδαίο πρόβλημα. Σε σήραγγες μονής κατεύθυνσης δεν παρατηρείται μεγάλος κίνδυνος συγκρούσεων, ενώ σε περίπτωση εκτροχιασμού η σήραγγα παραμένει εξίσου σταθερή. Επιπροσθέτως, η είσοδος ξένων αντικειμένων στο εσωτερικό της σήραγγας δεν είναι απίθανη κι έτσι ο κίνδυνος εκτροχιασμού απομακρύνεται από το προσκήνιο. Και στην περίπτωση αυτή η εκκένωση είναι αναγκαία. Η απώλεια ισχύος ή οποιοδήποτε σοβαρό πρόβλημα μπορεί να αναγκάσει τους επιβάτες να εκκενώσουν το βαγόνι, το οποίο πρέπει πρώτα να ακινητοποιηθεί (Salmensaari, 2010).

Διαρροές νερού

Η διαρροή νερού στις ζώνες διάρρηξης επηρεάζει την σταθερότητα της βραχομάζας. Κατά την κατασκευή μίας υποθαλάσσιας σήραγγας η ξαφνική εισαγωγή νερού λόγω κάποιου ατυχήματος αποτελεί αξιοσημείωτο κίνδυνο. Αφού έχει ολοκληρωθεί η κατασκευή της σήραγγας και είναι σε σταθερή κατάσταση, η κατάρρευση είναι απίθανο να συμβεί (Salmensaari, 2010).

Πυρκαγιά

Λαμβάνουμε υπόψη μας ότι σε μία σιδηροδρομική σήραγγα το τρένο φέρεται σαν μία κινούμενη εύφλεκτη μάζα. Στο τρένο έχουν ενσωματωθεί συστήματα καταστολής της φωτιάς, τα οποία παρουσιάζουν το πλεονέκτημα της άμεσης αντίδρασης. Αυτά τα συστήματα δίνουν τη δυνατότητα κατάσβεσης της φωτιάς χωρίς το τρένο να χρειάζεται να σταματήσει. Η πυρκαγιά σε μια σήραγγα εκδηλώνεται απότομα και γρήγορα φτάνει τη θερμοκρασία των 1000οC με αποτέλεσμα να προκληθεί, σοβαρή παραμόρφωση στη βραχομάζα, αυξάνοντας τον κίνδυνο της κατάρρευσης. Αν η πυρκαγιά εξακολουθεί να κλιμακώνεται τότε η ταχεία απόκριση και η γρήγορη κατάσβεση αποτελούν τις καλύτερες επιλογές. Τα συστήματα ψεκασμού συνήθως σχεδιάζονται με σκοπό να περιορίσουν την έντασή της και όχι να την καταστείλουν εντελώς, αφού η πραγματική κατάσβεση πραγματοποιείται από την πυροσβεστική. Ο εξαερισμός της σήραγγας με φρέσκο αέρα αποτελεί το πρώτο βήμα μετά από μια πυρκαγιά, ενώ ο έλεγχος των βλαβών και η πραγματοποίηση των απαραίτητων επισκευών ακολουθούν μετέπειτα (Salmensaari, 2010).

Κεφάλαιο 2 : Συμπεριφορά Ανθρώπων και Ατυχήματα

2.1 Η Ανθρώπινη Συμπεριφορά

Η ανθρώπινη συμπεριφορά επηρεάζει σημαντικά την εμφάνιση ανεπιθύμητων γεγονότων, την ανάπτυξη αυτών καθώς και την επιτυχία της παρέμβασης. Οι άνθρωποι υπό πραγματικές συνθήκες πιθανότατα να έχουν απρόσμενη συμπεριφορά παρά τον προσεκτικό σχεδιασμό και την προετοιμασία, αφού δεν ακολουθούν τις οδηγίες ή δεν ακολουθούν την επιθυμητή κατεύθυνση. Για το λόγο αυτό, η συμπεριφορά των ατόμων απαιτείται να βελτιωθεί σε καταστάσεις έκτακτης ανάγκης (General Thematic Network Fire in Tunnels: General report, n.d.).

Η πρόληψη των προβλημάτων είναι περίπλοκη διαδικασία και περιλαμβάνει προληπτικές μεθόδους για τον περιορισμό των πιθανοτήτων των διαφόρων προβλημάτων και τον περιορισμό των ζημιών. Συνήθως, μια καταστροφή είναι αποτέλεσμα διαφόρων παραγόντων. Γι' αυτό ακόμα και σε περίπτωση μικρότερων προβλημάτων πρέπει να εντοπιστούν οι λόγοι που οδήγησαν σε αυτή την κατάσταση ώστε να επιτευχθεί η περαιτέρω βελτίωση της έννοιας της ασφάλειας. Ένας αυτόνομος συντονιστής για θέματα ασφάλειας για τη διατήρηση της έννοιας της ασφάλειας των σιδηρόδρομων και των σχετικών διαδικασιών είναι δυνατό να εξασφαλίσει μια συνεχή παρακολούθηση και ανάπτυξη συστημάτων ασφαλείας. Είναι σημαντικό να διακρίνουμε τρεις ομάδες ανθρώπων (General Thematic Network Fire in Tunnels: General report, n.d.):

1. Χρήστες:
 - του οδικού δικτύου
 - του σιδηροδρομικού δικτύου
 - του μετρό.

2. Οι φορείς λειτουργίας:
 - το προσωπικό της αίθουσας ελέγχου
 - το προσωπικό της αμαξοστοιχίας (για μετρό και σιδηροδρομικές σήραγγες).

3. Το προσωπικό έκτακτης ανάγκης

Η ανθρώπινη συμπεριφορά διακρίνεται σύμφωνα με την κατάσταση σε (General Thematic Network Fire in Tunnels: General report, n.d.):

- συνήθης συμπεριφορά πριν από το γεγονός και πρόληψη των ατυχημάτων
- συμπεριφορά που προκαλεί ανεπιθύμητα γεγονότα, πυρκαγιές και ατυχήματα
- ανθρώπινη αντίδραση στη φωτιά
- διάσωση και εκκένωση
- αντιμετώπιση της πυρκαγιάς.

2.1.1 Επιβάτες του Τρένου και του Μετρό

Συμπεριφορά που Προκαλεί Ανεπιθύμητα Συμβάντα, Πυρκαγιές και Ατυχήματα

Η συμπεριφορά των επιβατών του τρένου και του μετρό, που μπορεί να προκαλέσει ατυχήματα και πυρκαγιές, έγκειται σε απροσεξία, δολιοφθορά ή τόλμη. Το κάπνισμα και οι εμπρησμοί αυξάνουν στον κίνδυνο (General Thematic Network Fire in Tunnels: General report, n.d.).

Ανθρώπινη Αντίδραση στην Πυρκαγιά

Οι σιδηροδρομικές σήραγγες συγκριτικά με τις οδικές σήραγγες η κατάσταση είναι περισσότερο ελεγχόμενη. Το προσωπικό της αμαξοστοιχίας είναι κατάλληλα εκπαιδευμένο στη σωστή συμπεριφορά σε περίπτωση πυρκαγιάς και είναι σε θέση να καθοδηγεί τους επιβάτες σε σχέση με τη φωτιά στη σήραγγα. Είναι σημαντικό οι οδηγίες που δίνονται να είναι σωστές, διαφορετικά μπορούν να οδηγήσουν σε κρίσιμες καταστάσεις. Έντυπα στα οποία δίνονται γενικές πληροφορίες για την ασφάλεια μπορεί να υπάρχουν στα τρένα. Οι επιβάτες έχουν τη δυνατότητα να αντιδράσουν ενεργοποιώντας το φρένο έκτακτης ανάγκης. Η ενεργοποίηση αυτή δεν είναι συχνά επιθυμητή σε σήραγγα καθώς είναι δυνατό να ακυρωθεί από τον οδηγό της μηχανής (General Thematic Network Fire in Tunnels: General report, n.d.).

Εκκένωση

Στην περίπτωση που το τρένο απαιτείται να εκκενωθεί εντός της σήραγγας, ένας μεγάλο αριθμό επιβατών επηρεάζεται, γι' αυτό ύψιστης σημασίας είναι ο σχεδιασμός και η ικανότητα των τρόπων διαφυγής. Οι επιβάτες μέχρι να δοθούν οι οδηγίες για την εκκένωση δεν θα πρέπει να εγκαταλείψουν το τρένο στη σήραγγα. Οι επιβάτες θα πρέπει να λειτουργούν σαν μία ομάδα και ο χρόνος για να αφήσει η ομάδα το τρένο μέχρι να φτάσει στην έξοδο εξαρτάται από την πόρτα, φωτισμό, πεζοδρόμια, καθώς

και από την ικανότητα κίνησης των επιβατών (General Thematic Network Fire in Tunnels: General report, n.d.)

2.2 Κατανόηση της καταστροφής και μαζική συμπεριφορά εκκένωσης έκτακτης ανάγκης

Η συμπεριφορά εκκένωσης μπορεί να χωριστεί κατά προσέγγιση σε τρεις τομείς:

- χρόνοι λήψης αποφάσεων και εξόδου
- κλινικά ζητήματα
- και συμπεριφορά του πλήθους.

Χρόνοι λήψης αποφάσεων και εξόδου

Υπάρχουν διάφορα ζητήματα σχετικά με τη λήψη αποφάσεων σε έξοδο έκτακτης ανάγκης. Η σοβαρότητα της απειλής και το επείγον της κατάστασης επηρεάζουν την ταχύτητα απόκρισης και ο μηχανισμός προειδοποίησης επηρεάζει την ερμηνεία του γεγονότος. Ο χρόνος που χρειάζεται έτσι ώστε οι άνθρωποι για να αποφασίσουν και να αρχίσουν να κινούνται έχει να κάνει με το σύνολο χρόνου σε σχέση με τα χαρακτηριστικά του σχεδιασμού όπως το πλάτος εξόδου και η απόσταση ταξιδιού. Ωστόσο, τα φυσικά χαρακτηριστικά του τόπου μπορεί να αλληλοεπιδρούν με ψυχολογικούς παράγοντες, όπως η διαπίστωση ότι οι εκκενωμένοι βασίζονται στις προβλεπόμενες διαδρομές ή τον τρόπο εισόδου τους και όχι στις καθορισμένες εξόδους πυρκαγιάς. Ενώ η υπερβολική αντίδραση και ο πανικός μπορεί να είναι μια δημοφιλής εικόνα μιας έκτακτης ανάγκης, όπως μια πυρκαγιά σε ένα κτίριο, η έρευνα δείχνει ότι οι άνθρωποι συχνά δεν αναγνωρίζουν την κατάσταση έκτακτης ανάγκης ή ενεργούν αρκετά γρήγορα. Ακόμη και όταν οι άνθρωποι ακούν αυτό που γνωρίζουν ότι είναι συναγερμός πυρκαγιάς, μερικές φορές υποθέτουν ότι ο εξοπλισμός μόλις δοκιμάζεται, είναι δυσλειτουργία ή απλώς ένα τρυπάνι. Έτσι, μια πρόσφατη ανασκόπηση των μεταφορικών ατυχημάτων κατέληξε στο συμπέρασμα ότι ένας από τους κύριους παράγοντες που καθορίζουν εάν ένας επιβάτης επιβιώνει είναι η ακρίβεια της αντίληψής τους για τις πηγές και το επίπεδο απειλής (Cocking & Drury, 2008).

Κλινικά ζητήματα

Κλινικά ζητήματα έχουν να κάνουν με την αποσύνδεση ή αποστασιοποίηση ψυχολογικά από την πραγματικότητα αυτού που συμβαίνει ή την πιο ήρεμη συμπεριφορά από ό,τι αρμόζει. Σε τέτοιες περιπτώσεις, οι άνθρωποι που απειλούνται και διατάσσονται να εκκενώσουν ένα χώρο σπαταλούν το χρόνο τους άσκοπα π.χ. (σε ένα κτίριο γραφείων σπαταλούν χρόνο ακατάλληλα τακτοποιώντας τα γραφεία τους,

απενεργοποιώντας προσεκτικά τους υπολογιστές τους και ούτω καθεξής) (Cocking & Drury, 2008).

Συμπεριφορά πλήθους

Η εκκένωση ενός πληθυσμού σε κατάσταση πανικού αποτελεί τη μετακίνηση ανθρώπων από μία επικίνδυνη περιοχή, λόγω κάποιας απειλής ή ενός καταστρεπτικού γεγονότος χωρίς όμως να υπάρχει ένας συγκεκριμένος προορισμός. Με τον όρο «μαζική εκκένωση» υποδηλώνεται ότι το πλήθος των ανθρώπων είναι λιγότερο ευφυές και λειτουργεί περισσότερο συναισθηματικά από ό,τι κάθε άνθρωπος μεμονωμένα και ότι οι αντιδράσεις του πλήθους σε μία κατάσταση πανικού θα είναι δυσανάλογες του πραγματικού κινδύνου. Έτσι τα «ένστικτα» θα ανατρέψουν τις κοινωνικοποιημένες αντιδράσεις και τους συλλογικούς δεσμούς ή οι κοινωνικοί κανόνες θα διαλυθούν, καθώς η ατομική επιβίωση έχει μεγαλύτερη σημασία. Το αποτέλεσμα είναι εγωιστική και ανταγωνιστική πανικόβλητη συμπεριφορά, που χαρακτηρίζεται από σπρωξίματα και ποδοπατήματα άλλων με σκοπό την προσωπική ασφάλεια. Αυτές οι ενέργειες μπορεί πολύ γρήγορα να διαδοθούν μέσω του πλήθους, διαδικασία γνωστή ως «μεταδοτική επίδραση – contagion», μιας και οι άνθρωποι συνηθίζουν να αντιγράφουν άκριτα την αντικοινωνική συμπεριφορά των άλλων ατόμων, χωρίς να λαμβάνουν υπόψη τους τις συνέπειες (Cocking & Drury, 2008).

2.3 Ατυχήματα

Μια πυρκαγιά σε ένα υπόγειο σύστημα μεταφοράς, που μπορεί να περιλαμβάνει τόσο σήραγγες όσο και σταθμούς του υπόγειου σιδηρόδρομου, μπορεί να έχει καταστροφικές συνέπειες τόσο από οικονομική ζημιά όσο και από απώλεια. Αυτό αποδεικνύεται σαφώς από πολλά ατυχήματα στο παρελθόν τόσο σε σιδηροδρομικές όσο και σε οδικές εγκαταστάσεις. Οι οδικές σήραγγες είναι συχνά σχετικά απλές όσον αφορά τη διάταξη και το σχεδιασμό, αλλά πολλές σιδηροδρομικές σήραγγες αποτελούν μέρος ενός μεγαλύτερου συστήματος μετρό, το οποίο περιλαμβάνει άλλους τύπους υπόγειων εγκαταστάσεων, όπως σταθμούς του μετρό.

Μια πυρκαγιά σε έναν σταθμό του υπόγειου σιδηρόδρομου θεωρείται μέρος του υπόγειου συστήματος μεταφοράς, μπορεί επίσης να οδηγήσει σε πολλούς θανάτους. Αυτό αποδεικνύεται από τη φωτιά του King's Cross στο Λονδίνο (Ηνωμένο Βασίλειο) που είχε ως αποτέλεσμα περισσότερους από 30 νεκρούς, καθώς και τη φωτιά στο σταθμό Jungangno του μετρό στο Νταέγκου της Νότιας Κορέας όπου σκοτώθηκαν πάνω από 180 άνθρωποι (Fridolf, Nilsson, & Frantzich, 2013).

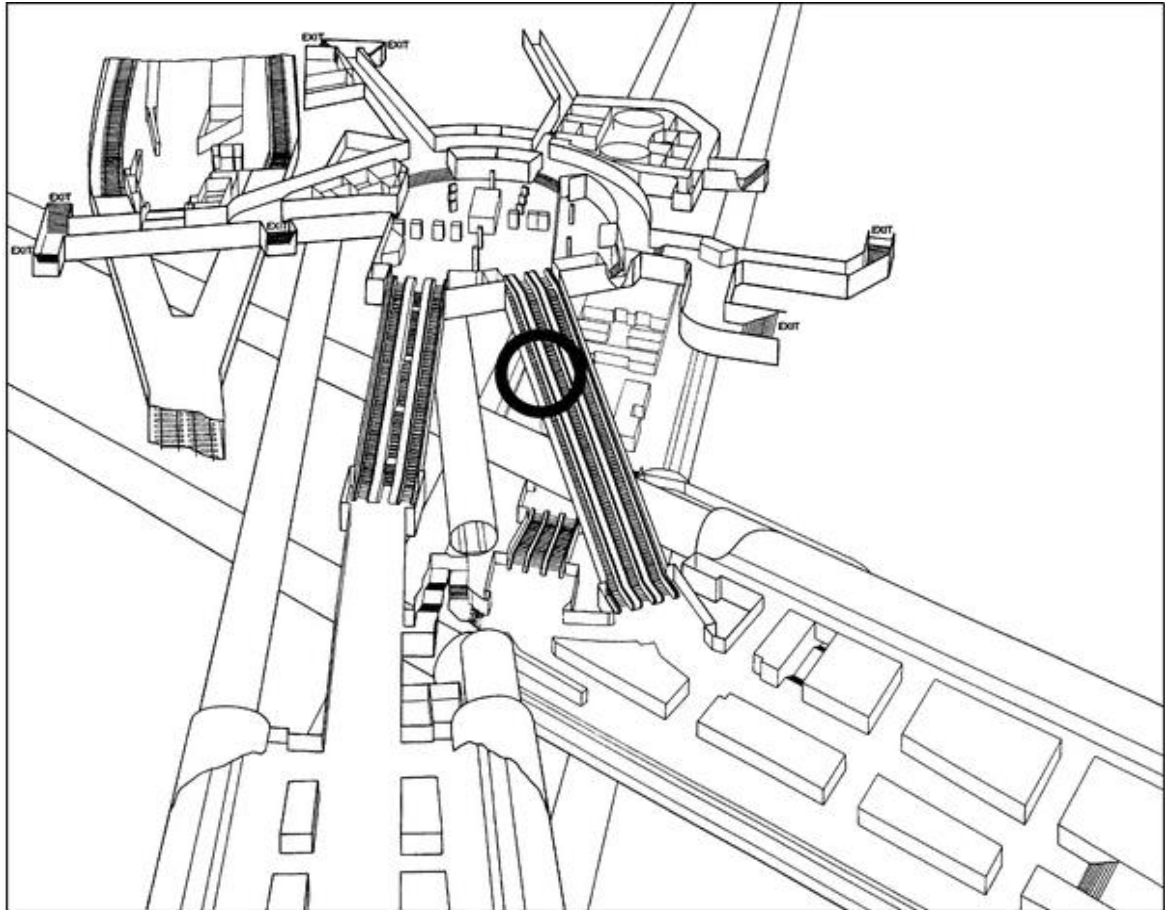
Υπάρχουν, ωστόσο, παράγοντες που είναι ιδιαίτερα σημαντικοί για την εκκένωση πυρκαγιάς στα υπόγεια συστήματα μεταφοράς. Για παράδειγμα, μια σήραγγα είναι πολύ διαφορετική σε σύγκριση με ένα κτίριο, καθώς η απόσταση από μια ασφαλή τοποθεσία, δηλαδή τις εισόδους της σήραγγας, τις εξόδους κινδύνου ή τα καταφύγια ασφαλείας, είναι συνήθως πολύ μεγάλη. Επομένως, ένας σημαντικός παράγοντας είναι η ταχύτητα κίνησης, η οποία μπορεί να επηρεαστεί από πτυχές όπως οι συνθήκες φωτισμού, το υλικό της επιφάνειας του δαπέδου και ο καπνός. Οι μεγάλες αποστάσεις

στις σήραγγες μπορούν επίσης να κάνουν τις επιχειρήσεις διάσωσης πιο περίπλοκες από ότι στα περισσότερα κτίρια. Αυτό σημαίνει ότι οι υπηρεσίες διάσωσης ενδέχεται να μην είναι σε θέση να βοηθήσουν σε περίπτωση εκκένωσης. Περιορισμοί ροής, όπως η μετακίνηση από το τρένο στο πάτωμα της σήραγγας, είναι επίσης σημαντικό να ληφθούν υπόψη για τις σήραγγες των σιδηροδρόμων, καθώς μπορούν εύκολα να δημιουργήσουν συμφόρηση σε μια κατάσταση εκκένωσης. Ένας άλλος σημαντικός παράγοντας είναι οι πληροφορίες, οι οποίες είναι σχετικές τόσο για την έναρξη της εκκένωσης όσο και για την κατεύθυνση των ατόμων στις κατάλληλες εξόδους (Fridolf et al., 2013).

Τα ατυχήματα που πραγματοποιήθηκαν με το πέρασμα των χρόνων έδειξαν ότι, μερικές φορές είναι δύσκολο να πείσουμε τους ανθρώπους να ανταποκριθούν. Πολλές από τις θεωρίες για την ανθρώπινη συμπεριφορά στην πυρκαγιά εφαρμόζονται σε ένα ευρύ φάσμα καταστάσεων και μπορούν ως εκ τούτου να εφαρμοστούν σε πυρκαγιές σε υπόγεια συστήματα μεταφοράς καθώς και σε πυρκαγιές κτιρίων. Αξίζει να σημειωθεί ότι για την κατανόηση της ανθρώπινης συμπεριφοράς γίνεται χρήση κάποιων μοντέλων (το μοντέλο ακολουθίας συμπεριφοράς, το μοντέλο κανόνα ρόλων, το συνδετικό μοντέλο και την κοινωνική επιρροή) όπου χρήζει μελέτη (Fridolf et al., 2013).

King's Cross – 1987

Μια πυρκαγιά ξέσπασε στις 18 Νοεμβρίου 1987 King's Cross στο Λονδίνο (Ηνωμένο Βασίλειο) στις κυλιόμενες σκάλες του σταθμού. Η αιτία που προκλήθηκε η φωτιά ήταν ένα σπύρτο, που ρίχτηκε απερίσκεπτα από έναν χρήστη. Με αποτέλεσμα να πυροδοτήσει ένα μείγμα σκόνης και υπολείμματος κάτω από τις κυλιόμενες σκάλες προκαλώντας την έναρξη της φωτιάς (Εικόνα 1). Οι άνθρωποι που έχασαν τη ζωή τους ανέρχονταν στους 31. Ο σταθμός δεν ήταν εξοπλισμένος με σύστημα πυρόσβεσης, ενώ παράλληλα οι εργαζόμενοι δεν ήταν κατάλληλα εκπαιδευμένοι για ένα τέτοιο γεγονός. Διότι η φωτιά επεκτάθηκε στην κεντρική αίθουσα εισιτηρίων πάνω από τις κυλιόμενες σκάλες όπου συσσωρεύτηκε καπνός και τελικά προκάλεσε ανατροπή. Οι υπηρεσίες διάσωσης έφτασαν περίπου 15 λεπτά μετά την έναρξη της πυρκαγιάς, όταν είχε βγει εκτός ελέγχου και η προσπάθειά τους ως εκ τούτου είχε αρχικά στόχο να βοηθήσει τους ανθρώπους και όχι την κατάσβεση της φωτιάς. Η διαδικασία εκκένωσης πραγματοποιήθηκε με την διαδικασία των τρένων που σταματούσαν στις εξόδους (Fridolf et al., 2013).



Εικόνα 2: Η εικόνα δείχνει την έναρξη της φωτιάς στις κυλιόμενες σκάλες του σταθμού του μετρό King's Cross (<http://www.nationalarchives.gov.uk/doc/open-government-licence/open-government-licence.htm>).

South Korea Daegu – 2003

Στις 18 Φεβρουαρίου 2003, ένα τρένο του μετρό πυρπολήθηκε από ένα ψυχικά άρρωστο άνθρωπο στο σταθμό Jungangno στο Daegu της Νότιας Κορέας. Η φωτιά εξαπλώθηκε γρήγορα. Τα καθίσματα, οι διαφημιστικές σανίδες και τα δάπεδα αποτελούνταν από εύφλεκτο υαλοβάμβακα, ανθρακούχο βινύλιο και πολυαιθυλένιο. Η φωτιά είχε επίσης εξαπλωθεί σε ένα άλλο τρένο στην αντίθετη κατεύθυνση, με όλους τους επιβάτες να χάνουν τη ζωή τους. Τα 12 συνολικά βαγόνια του μετρό κάηκαν ολοσχερώς με τον καπνό να γεμίζει ολόκληρο το σταθμό και τη θερμοκρασία να αυξάνεται γρήγορα (“SouthKoreaDaeguSubwayStation – Arson |,” n.d.).

Λίγα λεπτά μετά την ανάφλεξη, η θερμότητα και ο καπνός συγκεντρώθηκαν με αποτέλεσμα πολλά θύματα. Αυτό συνέβη επειδή τα συστήματα ανίχνευσης πυρκαγιάς έκλεισαν τους εξαερισμούς και την παροχή ηλεκτρικού ρεύματος στο σταθμό, με αποτέλεσμα 192 άνθρωποι πέθαναν και 148 άτομα τραυματίστηκαν. Τα συστήματα έκτακτης ανάγκης δεν λειτούργησαν σωστά. Σύμφωνα με έρευνα που διεξήχθη για το συμβάν οι βασικοί υπάλληλοι ελέγχου του σταθμού κατηγορήθηκαν για επαγγελματική αμέλεια.

Μετά από τη τραγωδία αυτή, η κυβέρνηση της Κορέας υποσχέθηκε να ενισχύσει την πυρασφάλεια σε όλα τα συστήματα του μετρό της χώρας. Στους εσωτερικούς χώρους σε όλα τα επιβατικά τρένα είναι απαραίτητο να χρησιμοποιούνται πυρίμαχα. Επίσης, τονίστηκε, σε άλλα συστήματα μετρό στην Κορέα με εξαίρεση το μετρό Daegu η αντικατάσταση των εύφλεκτων υλικών σε υλικά ανθεκτικά στη φωτιά (“South Korea Daegu Subway Station – Arson |,” n.d.).

Baku - 1995

Στις 28 Οκτωβρίου 1995, μια ηλεκτρική βλάβη οδήγησε σε πυρκαγιά σε ένα τρένο στο μετρό του Μπακού. Λόγω της βλάβης το τρένο σταμάτησε μεταξύ δυο σταθμών, Uldus και Narimanov. Η πυρκαγιά οδήγησε σε τραυματισμό 265 και σε θάνατο 289 άτομα.

Η σήραγγα διέθετε ελεγχόμενο σύστημα εξαερισμού. Η εκκένωση δεν είναι ασαφές από τι ξεκίνησε, ο καπνός γέμισε σύντομα τη σήραγγα ενώ το τρένο είχε σταματήσει. Ενώ ο οδηγός του τρένου αντιλήφθηκε λάθος, έδωσε οδηγίες στους χειριστές να διακόψουν την ηλεκτρική ενέργεια, αφού τα αυτοκίνητα τροφοδοτούνταν με ηλεκτρικό ρεύμα.

Οι επιβάτες ξεκίνησαν την εκκένωση. Λόγω του συνωστισμού και του γεγονότος ότι το ηλεκτρικό ρεύμα ήταν κλειστό, οι μοχλοί έκτακτης ανάγκης δεν θα λειτουργούσαν, ο μόνος τρόπος για να ανοίξουν οι πόρτες ήταν χειροκίνητα. Έτσι, όμως, ο καπνός πέρασε στα βαγόνια. Ο οδηγός του τρένου βοήθησε στην εκκένωση ανοίγοντας τις πόρτες στο μπροστινό και στο τέλος της αμαξοστοιχίας. Οι επιβάτες που κατάφεραν να βγουν από τα βαγόνια μπορούσαν να εκκενώσουν προς το σταθμό Uldus (200 m) είτε προς την κατεύθυνση προς Narimanov (2000 m). Η επιλογή εκκένωσης προς το σταθμό Uldus μειώθηκε καθώς η φωτιά μεγάλωνε.

Ο τοξικός καπνός, ο μειωμένος φωτισμός στη σήραγγα και η δυσκολία να περπατήσουν στην τάφρο μεταξύ των σιδηροτροχιών εμπόδισε την εκκένωση.

Οι συνθήκες εξαερισμού μετακινούσαν τον καπνό προς τα πίσω στο σταθμό Uldus. Λίγο αργότερα, ο καπνός άρχισε να κινείται προς τον σταθμό Narimanov, εμποδίζοντας τις συνθήκες για εκκένωση. Η γρήγορη ανάπτυξη πυρκαγιάς όπως και η αδυναμία ανοίγματος των θυρών του τρένου επηρέασε το αποτέλεσμα. Οι οργανωτικοί παράγοντες φάνηκε να ήταν ανεπαρκή (“Baku Metro Fire (1995) |,” n.d.).

Zürich - 1991

Στις 16 Απριλίου 1991, πυρκαγιά σημειώθηκε σε τρένο στο μετρό της Ζυρίχης στην Ελβετία. Η φωτιά που πιθανότατα προκλήθηκε από εμπρηστή, παρατηρήθηκε από έναν υπάλληλο του σταθμού. Το τρένο σταμάτησε σχεδόν στα μισά μέσα στη σήραγγα Hirschengraben μήκους 1,2 χιλιομέτρων, επειδή ένας επιβάτης στο τρένο έκανε το διάλειμμα έκτακτης ανάγκης. Παρόλο που η φωτιά δεν έσβησε δεν υπήρξαν τραυματίες ή θύματα. Η εκκένωση περιελάμβανε την επιβίβαση σε άλλο τρένο που είχε σταματήσει μέσα στη σήραγγα λόγω της πυρκαγιάς και της κατάστασης του καπνού. Ωστόσο, λόγω διακοπής ρεύματος έπρεπε να ξεκινήσει δεύτερη εκκένωση και από

αυτό το τρένο. Δηλαδή οι επιβάτες έπρεπε να ξεπεράσουν μια κατακόρυφη διαφορά ύψους 1 μέτρου μεταξύ του τρένου και του πατώματος της σήραγγας. Ωστόσο, οι εκκενωμένοι είδαν τον ανεπαρκή φωτισμό στο εσωτερικό της σήραγγας ως μεγαλύτερο πρόβλημα από τη διαφορά ύψους. Όχι μόνο ο φωτισμός κρύφτηκε από τον καπνό, το ίδιο το τρένο έβαλε μια σκιά στο πάτωμα όπου οι επιβάτες αποβίβαζαν το τρένο (Fridolf et al., 2013).

Με αποτέλεσμα λόγω της έλλειψης τεχνικών λύσεων που βοηθούν την εκκένωση ή οι λύσεις που έχουν σχεδιαστεί κακώς, μπορεί να προκαλέσει μια συμπεριφορά συνεργασίας μεταξύ ανθρώπων που δεν γνωρίζουν ο ένας τον άλλον εκ των προτέρων. Αυτό αποδείχθηκε από τη φωτιά στο μετρό της Ζυρίχης.

Κεφάλαιο 3: Χαρακτηριστικά φωτιάς και επιπτώσεις στον άνθρωπο

3.1 Χαρακτηριστικά της φωτιάς

Φωτιά είναι η καύση που συνοδεύεται από φλόγα. Πρόκειται για μια χημική αντίδραση κατά την οποία εκλύεται έντονα θερμότητα και κατά το φαινόμενο συντηρείται φλόγα, ως ορατό αποτέλεσμα της εξώθερμης αντίδρασης.

Η φωτιά είναι καυτή επειδή η μετατροπή του αδύναμου διπλού δεσμού σε μοριακό οξυγόνο, στους ισχυρότερους δεσμούς στα προϊόντα καύσης διοξείδιο του άνθρακα και το νερό απελευθερώνει ενέργεια. Σε ένα σημείο της αντίδρασης καύσης, που ονομάζεται σημείο ανάφλεξης, παράγονται φλόγες. Η φλόγα είναι το ορατό τμήμα της φωτιάς. Οι φλόγες αποτελούνται κυρίως από διοξείδιο του άνθρακα, υδρατμούς, οξυγόνο και άζωτο. Εάν είναι αρκετά ζεστό, τα αέρια μπορούν να ιονιστούν για την παραγωγή πλάσματος. Ανάλογα με την ουσία που ανάβει, και τυχόν άλλα στοιχεία που υπάρχουν γύρω από αυτήν, το χρώμα της φλόγας και η ένταση της φωτιάς μπορεί να είναι διαφορετικά.

Το υλικό που αντιδρά κατά την καύση ονομάζεται καύσιμο. Όταν αυτό είναι εύφλεκτο συνήθως έχουμε φλόγα και άρα φωτιά. Μια φωτιά ξεκινά όταν ένα εύφλεκτο καύσιμο υλικό, υπό την παρουσία οξυγόνου ή κάποιου άλλου οξειδωτικού παράγοντα, βρεθεί σε ακατάλληλη θερμοκρασία. Αυτό το κατώφλι θερμοκρασίας ονομάζεται σημείο ανάφλεξης και είναι διαιρετικό για κάθε υλικό.

Τα τρία στοιχεία που πρέπει να συνυπάρχουν ώστε να διατηρείται η φωτιά χαρακτηρίζονται ως τρίγωνο της φωτιάς. Αυτά είναι (Εικόνα 2):

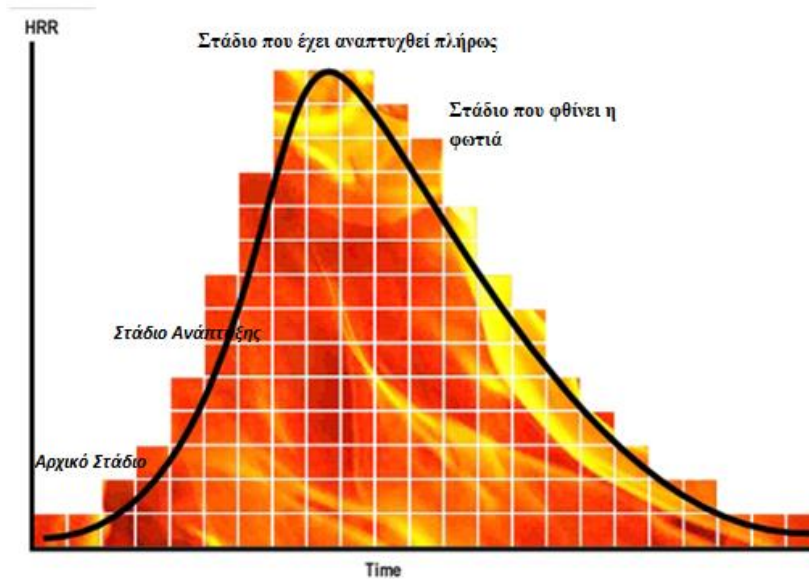
1. Καύσιμο
2. οξυγόνο (ή άλλος έντονα οξειδωτικός παράγοντας)
3. φλόγα (ή άλλη πηγή θερμότητας)



Εικόνα 3: Τα τρία στοιχεία που αποτελούν την φωτιά (“File:Fire triangle EL.svg - Wikimedia Commons,” n.d.).

Τα στάδια που ξεχωρίζουν κατά τη διάρκεια της φωτιάς είναι τέσσερα και είναι (Εικόνα 3) (“HSE Professionals : Fire Stages & Fire Types?,” n.d.):

- το αρχικό στάδιο (incipient stage) κατά το οποίο μια αργή πυρόλυση και προθέρμανση έχει ξεκινήσει
- το στάδιο της ανάπτυξης (growth stage) όπου έχει αναπτυχθεί πλήρως η πυρόλυση που αρχίζει με ανάφλεξη
- το στάδιο που έχει αναπτυχθεί πλήρως (fully developed) η φωτιά όλα τα εύφλεκτα υλικά έχουν αναφλεγεί
- το στάδιο που φθίνει η φωτιά (decay) στη διάρκεια του οποίου παρατηρείται σημαντική μείωση του οξυγόνου ή του καυσίμου, οδηγώντας στο τέλος της φωτιάς.



Εικόνα 4: Στάδια κατά τη διάρκεια της φωτιάς (“HSE Professionals : Fire Stages & Fire Types?,” n.d.).

3.1.1 Δυναμικά χαρακτηριστικά φωτιάς – Fire Dynamics

Ο τρόπος έναυσης, διάδοσης και ανάπτυξης της φωτιάς αντανακλώνται στα δυναμικά χαρακτηριστικά της. Η μελέτη αυτή εξετάζει τους τρόπους μεταφοράς θερμότητας (Heat Transfer), το ρυθμό έκλυσης θερμότητας (Heat Release Rate) και τη παραγωγή θερμοκρασίας (Temperature) (SFPE, 2016).

Μεταφορά θερμότητας – Heat Transfer

Η μεταφορά θερμότητας είναι ένας κλάδος θερμικής μηχανικής. Αυτός επικεντρώνεται στη μεταφορά, την ανταλλαγή και την ανακατανομή της θερμικής ενέργειας. Η θερμότητα μπορεί να μεταφερθεί με αγωγιμότητα (conduction), μεταφορά (convection) και ακτινοβολία (radiation) (Ezekoye, 2016). Ειδικότερα:

Αγωγιμότητα (conduction)

Η μεταφορά θερμότητας με τον τρόπο αυτό πραγματοποιείται μόνο σε ένα μέσο (αέριο, υγρό ή στερεό), σε αντίθεση με την ακτινοβολία όπου δεν απαιτείται μέσο. Η ενέργεια διαχέεται αργά από ένα σημείο υψηλότερης θερμοκρασίας σε ένα σημείο χαμηλότερης θερμοκρασίας (Atreya, 2016) μέσα από ένα μέσο.

Ακτινοβολία (radiation)

Πρόκειται για τον κυρίαρχο τρόπο μεταφοράς θερμότητας που παράγεται από τις φλόγες. Όλα τα αντικείμενα με πεπερασμένη θερμοκρασία εκπέμπουν θερμική ακτινοβολία μέσω φυσικό μηχανισμό που σχετίζεται με τις ταλαντώσεις και τις μεταπτώσεις των ηλεκτρονίων (Atreya, 2016).

Ρυθμός έκλυσης θερμότητας (Heat Release Rate)

Η μέτρηση της θερμότητας είναι αρκετά σημαντική δεδομένου ότι η θερμότητα είναι το ενεργειακό αποτέλεσμα της φωτιάς. Αυτό που είναι περισσότερο ενδιαφέρον είναι το ποσοστό της θερμότητας απελευθερώνεται. Ο ρυθμός απελευθέρωσης θερμότητας (HRR) μπορεί να μετρηθεί σε Joules ανά δευτερόλεπτο, τα λεγόμενα Watts (Tien et al., 2016). Στην πραγματικότητα το HRR είναι η πιο σημαντική μεταβλητή στην περιγραφή κινδύνων πυρκαγιάς (Babrauskas, 2016). Οι σημαντικότεροι λόγοι για τους οποίους συμβαίνει αυτό είναι οι ακόλουθοι:

1. το HRR είναι η κινητήρια δύναμη για τη φωτιά,
2. οι περισσότερες άλλες μεταβλητές είναι σχετικές με το HRR
3. υψηλό HRR ταυτίζεται με μεγάλη απειλή για τη ζωή.

Θερμοκρασία

Η αναφορά στη φωτιά συνεπάγεται τη μεγάλη σημασία της θερμοκρασίας που παράγεται από τις φλόγες. Όταν οι θερμοκρασίες των παραγόμενων αερίων αυξηθούν αρκετά, το φαινόμενο flashover μπορεί να συμβεί. Το φαινόμενο flashover πιστεύεται ότι παρατηρείται όταν ο μέσος όρος της θερμοκρασίας των υψηλότερων στρώσεων των αερίων σε ένα χώρο υπερβαίνει τους 600oC (Babrauskas, 2008).

Προϊόντα Καύσης – Fire Products

Τα προϊόντα της καύσης, ο καπνός (soot) και η θερμοκρασία επιδρούν στην ανθρώπινη ζωή. Ειδικότερα το μονοξείδιο του άνθρακα (το πιο κοινό ασφυξιογόνο αέριο που παράγεται κατά τη διάρκεια της καύσης) έχει αναγνωριστεί ως η κύρια αιτία θανάτου κατά τη διάρκεια μιας πυρκαγιάς (Babrauskas, 2008). Αυτό μπορεί να προκαλέσει απώλεια των αισθήσεων ή ακόμα και θάνατο καθώς τα μόρια του μονοξειδίου του άνθρακα έχουν την ικανότητα να συνδέονται καλύτερα με την αιμοσφαιρίνη που υπάρχει στο αίμα σε σχέση με τα μόρια του οξυγόνου, οδηγώντας σε μείωση της παροχής οξυγόνου στο ανθρώπινο οργανισμό και ειδικά στον εγκέφαλο. Το διοξείδιο του άνθρακα συγκαταλέγεται στα πιο συχνά τοξικά αέρια (Purser, 1984). Παρά τις θανατηφόρες συνέπειες των αερίων αυτών, το Soot είναι ο κύριος λόγος που δυσχεραίνει την προσπάθεια εκκένωσης των χρηστών με τη μείωση φωτεινότητας του χώρου, την ορατότητα του χρήστη και την ικανότητα του προσανατολισμού να επηρεάζονται. Η παρουσία πυκνού καπνού προκαλεί και ψυχολογική πίεση στο χρήστη. Η μέτρηση των συγκεντρώσεων των προϊόντων της φωτιάς συμβάλλει στην εξέταση των επιπτώσεων αυτών στους χρήστες. Αυτό πραγματοποιείται με τον υπολογισμό της Κλασματικής Ενεργής Δόσης των τοξικών αερίων (Fractional Effective Dose = FED) και της συγκέντρωση του καπνού.

3.1.2 Επίπτωση της φωτιάς σε σήραγγα (εκρηκτική αποφλοίωση).

Γενικότερα το σκυροδέμα δεν καίγεται και έχει μικρή θερμική αγωγιμότητα, όμως κατά την αύξηση της θερμοκρασίας υπόκειται σε διεργασίες που επηρεάζουν τη δομή του και μειώνουν τις μηχανικές ιδιότητες του. Στον (Πίνακα 1) συνοψίζεται η συμπεριφορά του σκυροδέματος σε υψηλές θερμοκρασίες (Popovics 1992) (Sakkas K.

et al, 2010). Το βασικό πρόβλημα του σκυροδέματος σε σχέση με την αύξηση της θερμοκρασίας είναι η εκρηκτική αποφλοίωση του. Η εκρηκτική αποφλοίωση συμβαίνει όταν το σκυρόδεμα εκτίθεται σε υψηλές και απότομα αυξανόμενες θερμοκρασίες προκαλώντας τη βίαιη ή μη αποκοπή στρώματος ή κομματιών σκυροδέματος από την επιφάνεια μιας κατασκευής, μείωση της θλιπτικής αντοχής με αποτέλεσμα τη μείωση της φέρουσας ικανότητας του. Όταν γίνεται αναφορά στο όρο αποφλοίωση εννοείται η εκρηκτική αποφλοίωση καθώς η εκρηκτική αλλά και η πολλαπλή φύση της την καθιστά υψηλού κινδύνου (Sakkas K. et al, 2010).

Πίνακας 2: Συμπεριφορά του σκυροδέματος σε υψηλές θερμοκρασίες (Poronics 1992).

Θερμοκρασία	Φυσικές διεργασίες	Επίδραση στις ιδιότητες
0-100 °C	-Εξάτμιση του φυσικά προσροφημένου νερού και του νερού του μεσοστρώματος των υδροξυλίων	Μικρή αύξηση της θλιπτικής αντοχής και μείωση του μέτρου ελαστικότητας
100-400 °C	-Εξάτμιση του μηχανικά συνδεδεμένου νερού, - Διάσπαση του Ca(OH)_2 σε CaO και H_2O η οποία όχι μόνο επιταχύνει την αποφλοίωση αλλά και μειώνει την αντοχή του σκυροδέματος	-Μείωση της θλιπτικής αντοχής και περαιτέρω μείωση του μέτρου ελαστικότητας , -Το τσιμέντο χάνει τη σταθερότητα του αφού μειώνονται οι δυνάμεις συνοχής μεταξύ των υδροξυλίων -Εκρηκτική αποφλοίωση (150°C -300°C)
400-500 °C	-Το συνδεδεμένο με τα υδροξείδια του ασβεστίου νερό ελευθερώνεται μέσω της πίεσης των υδρατμών και λειτουργεί διαρρηκτικά προκαλώντας αποφλοίωση του σκυροδέματος,	Ισχυρή μείωση της θλιπτικής αντοχής και του μέτρου ελαστικότητας, έντονη εκρηκτική αποφλοίωση του,
500-900 °C	-Τα χαλαζιακά συστατικά του σκυροδέματος (άμμος , αδρανή) μεταβάλλουν τον όγκο τους λόγω του μετασχηματισμού του χαλαζία από α σε β. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα το σκυρόδεμα να υπόκειται σε φαινόμενα ερπησμού -Διάσπαση ανθρακικού ασβεστίου	-Ελάχιστη παραμένουσα αντοχή, -Το σκυρόδεμα χάνει την φέρουσα ικανότητα του -Αποσύνθεση τσιμεντοπολτού
>900 °C		Τήξη σκυροδέματος

Παρατηρείται ότι στο εύρος μεταξύ 400 °C – 500 °C πραγματοποιείται αποφλοίωση του σκυροδέματος (spalling). Αποφλοίωση είναι η βίαιη ή μη αποκοπή στρώματος ή κομματιών σκυροδέματος από την επιφάνεια μιας κατασκευής όταν εκτίθεται σε υψηλές και απότομα αυξανόμενες θερμοκρασίες όπως συμβαίνει δηλαδή στις πυρκαγιές. Συνολικά υπάρχουν τέσσερις διαφορετικοί τρόποι αποφλοίωσης (Sakkas K. et al, 2010) :

1. Αποφλοίωση αδρανών (Aggregate spalling)
2. Αποφλοίωση γωνιών (Corner spalling)
3. Επιφανειακή αποφλοίωση (surface spalling)
4. Εκρηκτική αποφλοίωση (explosive spalling)

Ο πιο συνηθισμένος τύπος αποφλοίωσης είναι ο τελευταίος και πραγματοποιείται λόγω τριών παραγόντων (Sakkas K. et al, 2010):

- Λόγω πίεσης των πόρων (pore pressure spalling)
- Λόγω θερμικών εφελκυστικών τάσεων (Thermal stress spalling)
- Λόγω συνδυασμού των δύο παραπάνω

Στην τελευταία περίπτωση, που είναι και η συνηθέστερη αναπτύσσονται αρχικά παράλληλα στην επιφάνεια μικρορωγμές και στη συνέχεια το σύνολο των τάσεων υπερβαίνει την εφελκυστική αντοχή του υλικού με αποτέλεσμα να δημιουργείται βίαιη αστοχία της θερμαινόμενης επιφάνειας και απότομη απελευθέρωση ενέργειας (Khoury et. al. 2005). Οι παράγοντες που επηρεάζουν την εκρηκτική αποφλοίωση είναι οι παρακάτω (Sakkas K. et al, 2010) :

- Η αντοχή, ηλικία και αγωγιμότητα του σκυροδέματος
- Ο ρυθμός αύξησης της θερμότητας
- Το σχήμα της διατομής της σήραγγας
- Το μέγεθος και ο τύπος των αδρανών
- Η περιεκτικότητα σε υγρασία
- Η παρουσία μικρορωγμών

3.2 Επιπτώσεις της φωτιάς στον άνθρωπο – Μέτρηση και Αξιολόγηση με χρήση δεικτών

Όλες οι φωτιές παράγουν υψηλή θερμότητα και μεγάλες ποσότητες καπνού που δυσκολεύουν την ορατότητα και την κίνηση, μπλοκάρουν τις εξόδους διαφυγής καθιστώντας τους ανθρώπους ανίκανους να αντιδράσουν. Ο διαθέσιμος χρόνος προς εκκένωση είναι πολύ ενδιαφέρον στοιχείο σε τέτοια περιστατικά. Ωστόσο, ο διαθέσιμος χρόνος διαφυγής απαιτείται να είναι μικρότερος από τον απαιτούμενο χρόνο εκκένωσης, αποτελώντας το κρίσιμο κριτήριο για την προστασία της

ανθρώπινης ζωής έναντι φωτιάς (G. Hartzell, H. Emmons, 1988). Το χρονικό διάστημα που μεσολαβεί από τη στιγμή της ανάφλεξης μέχρι τη στιγμή κατά την οποία οι επιβάτες δεν μπορούν να πετύχουν τη διαφυγή τους αποτελεί το διαθέσιμο χρόνο διαφυγής (SFPE 2002). Τέτοιες συνθήκες δημιουργούνται εξαιτίας:

1. Εισπνοής ασφυξιογόνων αερίων με αποτέλεσμα την απώλεια των αισθήσεων και κατά συνέπεια τη δηλητηρίαση (toxicity).
2. Έκθεσης σε θερμότητα λόγω συναγωγής ή ακτινοβολίας (exposure to heat).
3. Δυσκολία της ορατότητας από την παρουσία πυκνού καπνού (visibility impairment).

3.2.1 Δηλητηρίαση λόγω επικίνδυνων τοξικών αερίων (Τοξικότητα)

Τα τοξικά προϊόντα μιας πυρκαγιάς ευθύνονται για τους τραυματισμούς και τους θανάτους. Ωστόσο, οι υπάρχουσες μέθοδοι μέτρησης των τοξικών ποσοτήτων έχουν σοβαρούς περιορισμούς (Stec et al. 2009). Ο υπολογισμός του κινδύνου λόγω τοξικών αερίων είναι εφικτή με πειράματα φωτιάς μεγάλης κλίμακας. Πρόκειται για πολύ ακριβά πειράματα. Επίσης, αρκετές φορές, τα πειράματα μικρής κλίμακας προσομοιάζουν τις συνθήκες πλήρους κλίμακας ελλιπώς.

Για το λόγο αυτό, ορισμένοι δείκτες συμβάλλουν στην ποσοτικοποίηση του κινδύνου λόγω των αερίων αυτών. Ένας τέτοιος δείκτης είναι ο FED (Fractional Effective Dose - Κλασματική δραστική δόση) και αναφέρεται στη μη ανεκτή δόση από τον ανθρώπινο οργανισμό (Incapacitating dose) λόγω της αύξησης των συγκεντρώσεων του μονοξειδίου και του διοξειδίου του άνθρακα και της μειωμένης συγκέντρωσης του οξυγόνου. Ο δείκτης αυτός δίνεται από την ακόλουθη σχέση (Korhonen & Hostikka, 2010) :

$$FED_{IN} = FED_{CO} \times V_{CO2} + FED_{O2}$$

όπου:

FED_{IN} : Fractional Effective Dose of an incapacitating dose (Κλασματική δραστική δόση, μη ανεκτή από τον άνθρωπο)

FED_{CO} : Fractional Effective Dose of Carbon Monoxide (Κλασματική δραστική δόση μονοξειδίου του άνθρακα).

Δίνεται από τη σχέση (SFPE, 2016):

$$FED_{CO} = \sum_{t1}^{t2} \frac{K \times (CO)^{1,036}}{D} \times \Delta t$$

όπου:

Δt [min]: το χρονικό διάστημα που μελετάμε

CO [ppm]: η μέση συγκέντρωση του μονοξειδίου σε διάστημα Δt .

K,D : Σταθερές σχετικές με τη δραστηριότητα του ανθρώπου.

Οι τιμές τους φαίνονται στον πίνακα που ακολουθεί:

Πίνακας 3: Τιμές των σταθερών K και D ανάλογα με τη δραστηριότητα του ανθρώπου (Purser, 2002).

Δραστηριότητα	K	D
Ξεκούραση	2.81945×10^{-4}	40
Ελαφριά εργασία	8.29250×10^{-4}	30
Βαριά εργασία	1.65850×10^{-4}	20

Όταν το διοξείδιο του άνθρακα (CO₂) βρεθεί σε συγκεντρώσεις μεγαλύτερες του 5% δυσκολεύει την αναπνοή, παρά το γεγονός ότι δεν είναι τοξικό. Επιπλέον, η συνεχής εισαγωγή καθαρού αέρα (υπεραερισμός) οδηγεί σε αύξηση του ρυθμού παραγωγής άλλων τοξικών αερίων, όπως το μονοξείδιο του άνθρακα (CO) κι επομένως να μειωθεί ο χρόνος μέχρι το θάνατο. Η αύξηση της συγκέντρωσης των τοξικών αερίων λόγω του υπεραερισμού λαμβάνεται υπ όψη με την εισαγωγή του παράγοντα V_{CO2}, ο οποίος δίνεται από τη σχέση (McAllister, 2016) (SFPE, 2016):

$$V_{CO_2} = \frac{\exp(0.1903 \times \%CO_2 + 2.0004)}{7.1}$$

όπου:

%CO₂: είναι το ποσοστό του διοξειδίου του άνθρακα στο διαμέρισμα που μελετάμε.

Ομοίως, η κλασματική δραστική δόση για την έλλειψη οξυγόνου δίνεται από τη σχέση (McAllister, 2016):

$$FED_{O_2} = \frac{t}{\exp\{8.13 - 0.54(20.9\% - \%O_2)\}}$$

όπου:

(20.9%-%O₂): είναι η ποσοστιαία μείωση του οξυγόνου σε χρονικό διάστημα Δt.

Αξίζει να σημειωθεί ότι ποσοστό οξυγόνου 20.9% αντανακλά το κανονικό ατμοσφαιρικό επίπεδο οξυγόνου.

Σε περίπτωση που κάποιος βρεθεί σε χώρο όπου οι τιμές του δείκτη FED υπερβαίνουν το 1, πιθανότατα οι συνθήκες του χώρου να είναι θανάσιμες για αυτόν. Τα όρια για έναν υγιή ενήλικα τίθενται στο 0,5 ενώ για έναν ευαίσθητο πληθυσμό στο 0,3 (AFAC, 2010). Ο σχεδιασμός όμως πρέπει να στοχεύει στην προστασία του γενικού πληθυσμού, μεταξύ των οποίων συγκαταλέγονται και τα ευάλωτα άτομα. Για το λόγο αυτό η επιλογή της κατωτάτης οριακής τιμής του FED πρέπει να είναι 0,3 σύμφωνα τον κανονισμό AFAC (Australasian Fire Authorities, 2010).

Στον Πίνακα 3 παρουσιάζονται ενδεικτικά όρια αντοχής σε ασφυξιογόνα αέρια ανάλογα το χρόνο έκθεσης σύμφωνα με το κανονισμό AFAC. Στον Πίνακα 4 απεικονίζονται ενδεικτικά όρια συγκέντρωσης μονοξειδίου του άνθρακα καθώς και οι χρόνοι που μπορεί να αντέξει ο άνθρωπος υπό αυτές τις συνθήκες.

Πίνακας 4: Ενδεικτικά όρια αντοχής σε συγκέντρωση τοξικών αερίων (AFAC, 2010).

	5 min έκθεση		30 min έκθεση	
	Ανικανότητα Εκκένωσης* (αυτοδιάσωσης)	Θάνατος	Ανικανότητα Εκκένωσης* (αυτοδιάσωσης)	Θάνατος
Μονοξείδιο του άνθρακα CO	6000 ppm	12000 ppm	1400 ppm	2500 ppm
Υδροκυάνιο HCN	150 ppm	250 ppm	90 ppm	170 ppm
Χαμηλό Οξυγόνο O₂ (Υποξία)	<13%	<5%	<12%	<7%
Διοξείδιο του άνθρακα CO₂	>7%	>10%	>6%	>9%

*Στην πράξη λαμβάνονται χαμηλότερες τιμές για την ικανότητα του επιβάτη να εκκενώσει μόνος του τον χώρο.

Πίνακας 5: Ενδεικτικά όρια αντοχής σε συγκέντρωση μονοξειδίου του άνθρακα (engineeringtoolbox.com).

CO (ppm)	Χρόνος έκθεσης	Συμπτώματα
35	8 ώρες	Μέγιστη επιτρεπτή σε εργασιακό χώρο σε διάστημα 8 ωρών (σύμφωνα με Occupational Safety and Health Administration-OSHA)
200	2-3 ώρες	Ήπιος πονοκέφαλος, κούραση, ναυτία και ζαλάδα
400	1-2 ώρες	Σοβαρός πονοκέφαλος, απειλή της ζωής έπειτα από 3 ώρες
800	45 λεπτά	Ζαλάδα, ναυτία, συσπάσεις. Αναισθησία σε διάστημα 2 ωρών και θάνατος εντός 2-3 ωρών
1600	20 λεπτά	Πονοκέφαλος, ναυτία, ζαλάδα. Θάνατος εντός 1 ώρας
3200	5-10 λεπτά	Πονοκέφαλος, ναυτία, ζαλάδα. Θάνατος εντός 1 ώρας
6400	1-2 λεπτά	Πονοκέφαλος, ναυτία, ζαλάδα. Θάνατος εντός 25-30 λεπτών
12800	1-3 λεπτά	Θάνατος

3.2 Ρεύματα θερμότητας (λόγω συναγωγής και ακτινοβολίας)

Η θερμότητα λόγω συναγωγής σχετίζεται με τη διαφορά θερμοκρασίας του ανθρώπινου σώματος και της θερμοκρασίας του περιβάλλοντος. Έχουν διεξαχθεί αρκετές μελέτες σχετικά με το τι ρόλο παίζει η στάση ενός ανθρώπου στη μεταφορά θερμότητας λόγω συναγωγής (Kurazumi et al. 2008). Η θερμότητα λόγω ακτινοβολίας ορίζεται η θερμότητα που νιώθει κάποιος που βρίσκεται κοντά σε μια φωτιά. Όσο πλησιάζουμε στη φωτιά αυτή γίνεται εντονότερη. Κατά την εκπομπή της θερμότητας στην ατμόσφαιρα η ένταση αυτής ελαττώνεται λόγω της απορρόφησης στην ατμόσφαιρα διοξειδίου του άνθρακα και υδρατμών.

Πειράματα έχουν πραγματοποιηθεί σχετικά με την αντοχή του ανθρώπου στο συγκεκριμένο είδος θερμότητας με βάση το είδος των ρούχων που φοράει (Raj, 2008). Έχει αποδειχθεί ότι ένας μέσος ενήλικας μπορεί να αντέξει ρεύμα θερμότητας λόγω ακτινοβολίας ίσο προς 5 kW/m^2 για 30 δευτερόλεπτα, χωρίς σοβαρό τραυματισμό ή μεγάλο πόνο. Η ένδυση με λεπτά ρούχα μειώνει το ρεύμα θερμότητας στο δέρμα κατά το μισό ή κατά το $1/3$ (Raj, 2008).

Υπάρχουν τρεις βασικοί τρόποι με τους οποίους η έκθεση σε θερμότητα είναι δυνατό να οδηγήσει σε θάνατο και είναι οι εξής (Hartzell and Emmons, 1988) :

- Επιφανειακά εγκαύματα
- Υπερθερμία
- Καταστροφή των αναπνευστικών οδών.

Έκθεση μεγάλης διάρκειας σε μικρό ρεύμα θερμότητας ακτινοβολίας ή θερμοκρασία είναι περισσότερο ανεκτή από έκθεση μικρότερης διάρκειας σε μεγαλύτερη θερμοκρασία ή ρεύμα θερμότητας. Συνεπώς, η συνολική δραστική δόση θερμότητας (Fractional Effective Dose of Heat) κατά την έκθεση ενός ανθρώπου σε αυτήν υπολογίζεται από τη σχέση:

$$FED_{HEAT} = \int_{t_1}^{t_2} \left(\frac{1}{t_{Irad}} + \frac{1}{t_{Iconv}} \right) \times \Delta t$$

όπου:

t_{Irad} (min): ο χρόνος που απαιτείται για να καεί το δέρμα εξαιτίας θερμότητας ακτινοβολίας. Όπως έχει ήδη αναφερθεί, μια ανεκτή τιμή είναι τα 2.5 kW/m^2 . Καθώς οι τιμές αυξάνονται ($q_{rad} \geq 2.5 \text{ kW/m}^2$), ο χρόνος t_{Irad} μειώνεται γρηγορότερα, σύμφωνα με την παρακάτω εξίσωση:

$$t_{Irad} = 1.33 \times q_{rad} - \frac{4}{3}$$

όπου:

q_{rad} (kW/m^2): το ρεύμα θερμότητας λόγω ακτινοβολίας.

Ως t_{Iconv} (min) ορίζεται ο χρόνος που οδηγεί σε μία ανυπόφορη κατάσταση υπό συνθήκες έκθεσης σε θερμότητα συναγωγής σε περιβάλλον όπου ο αέρας περιέχει λιγότερο από 10% κατ' όγκων υδρατμό και δίνεται από την εξίσωση:

$$t_{Iconv} = K_1 \times T^{K_2}$$

όπου:

T ($^{\circ}\text{C}$): η θερμοκρασία.

K1 και K2: σταθερές των οποίων οι τιμές από το ρουχισμό όπως δίνονται στον παρακάτω πίνακα.

Πίνακας 6: Τιμές των K1 και K2 ανάλογα τον τύπο του ρουγισμού (P. Raj, 2008).

	K1	K2
Για ρούχα που καλύπτουν όλο το σώμα	4.1×10^8	-3.61
Για πιο ελαφριά ή καθόλου ρούχα	5.0×10^8	-3.40

Άρα η επιλογή της κατωτάτης οριακής τιμής του FED πρέπει να είναι 0,3 με βάση τον κανονισμό AFAC (Australasian Fire Authorities Council).

Πίνακας 7: Ενδεικτικά όρια αντοχής σε διάφορες θερμοκρασίες (AFAC,2010).

Συμβάν	Αιτία	Επίπεδο έκθεσης
Θερμοπληξία	Παρατεταμένη έκθεση (περισσότερο από 15 min) σε θερμά περιβάλλοντα	60-120°C
Ακαριαίος θάνατος	Έκθεση σε μεταφερόμενη θερμότητα (ξηρός αέρας <10% νερό)	>120°C
Πόνοι ή εγκαύματα δέρματος	Έκθεση σε μεταφερόμενη θερμότητα (νερό – κορεσμένος αέρας)	>60°C
	Έκθεση σε ακτινοβολούμενη θερμότητα	>2,5 Kw/m ²
	Έκθεση σε θερμότητα μέσω αγωγής (επαφή με καυτή επιφάνεια μετάλλου)	>60°C
Εγκαύματα της αναπνευστικής οδού	(ίδια με τα δερματικά εγκαύματα)	(ίδια με τα δερματικά εγκαύματα)

Για το μη προστατευμένο δέρμα των ανθρώπων προτείνεται ένα όριο περίπου 120°C για θερμική ενέργεια από συναγωγή. Αν το όριο αυτό ξεπεραστεί, προκαλείται μεγάλος πόνος και εγκαύματα μέσα σε λίγα λεπτά. Σε συνάρτηση με τη θερμότητα και τη διάρκεια της έκθεσης που δέχεται ένα άτομο σε αυτή τη θερμοκρασία μπορεί να προκληθεί ανικανότητα λόγω υπερθερμίας.

Πίνακας 8: Χρόνοι ανοχής σε διάφορες ροές ακτινοβολίας και θερμοκρασίες αέρα (SFPE, 2016).

Τύπος μεταφοράς θερμότητας	Ένταση	Χρόνος αντοχής
Ακτινοβολία	<2,5 kW/m ²	>5 min
	2,5 kW/m ²	30 s
	10 kW/m ²	4 s
Συναγωγή	<60°C 100% κορεσμένος	>30 min
	100°C <10% H ₂ O	12 min
	120°C <10% H ₂ O	7 min
	140°C <10% H ₂ O	4 min
	160°C <10% H ₂ O	2 min
	180°C <10% H ₂ O	1 min

3.3 Ορατότητα

Ο πυκνός καπνός έχει αρνητική επίδραση στην ταχύτητα κίνησης των ανθρώπων και στην ικανότητα επιλογής των κατάλληλων εξόδων διαφυγής. Ο βαθμός που επηρεάζει τους χρήστες ο καπνός εξαρτάται από τη συγκέντρωση του (οπτική πυκνότητα = optical density), την ερεθιστικότητα του στην αναπνευστική οδό και στα μάτια. Η επίρροή του καπνού στην ορατότητα μπορεί να εκτιμηθεί με δυο μεθόδους: α) με χρήση του δείκτη FEC (Fractional Effective Concentration) με βάση το χώρο και β) με προσαρμογή της ταχύτητας με την οποία κινούνται οι χρήστες με βάση τη ορατότητά τους κατά τη διάρκεια της εκκένωσης (Yamada, T. & Akizuki, 2016).

3.3.1 Δείκτης FEC

Η χρήση του δείκτη FEC στην παρεμπόδιση της ορατότητας (Fractional Effective Concentrations) υπολογίζεται από την παρακάτω σχέση (SFPE, 2016):

- $FEC_{SMOKE} = OD/0.2$, για μικρούς χώρους και αποστάσεις με μέγιστη ορατότητα 5m.
- $FEC_{SMOKE} = OD/0.08$, για μεγάλους χώρους και αποστάσεις με μέγιστη ορατότητα 10m.

όπου:

OD [1/m]: η οπτική πυκνότητα του καπνού.

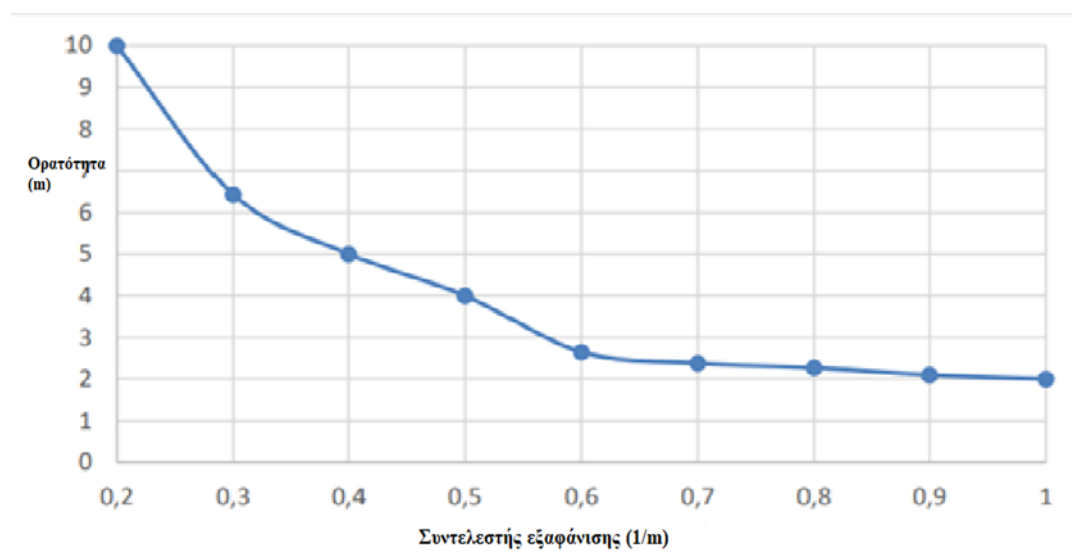
Η συγκέντρωση καπνού εκφράζεται σαν κλάσμα της συγκέντρωσης που πιστεύεται ότι επηρεάζει τη δυνατότητα διαφυγής. Όταν $FEC_{SMOKE, total} = 1$, τότε το εμποδίζεται οποιαδήποτε προσπάθεια διαφυγής από το επίπεδο ορατότητας (Yamada, T. & Akizuki, 2016).

3.3.2 Ταχύτητα κίνησης χρηστών βάση της ορατότητάς τους

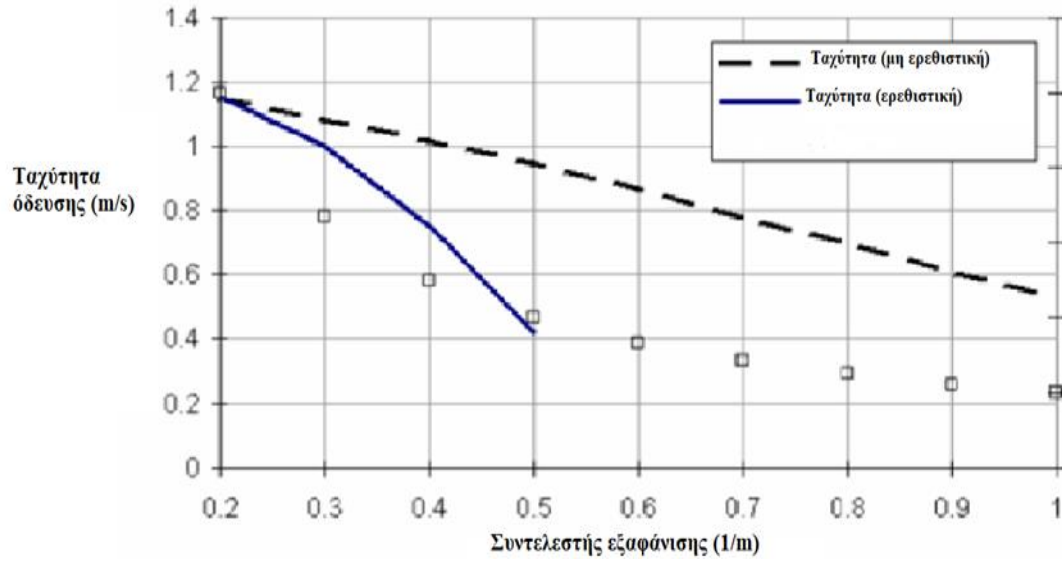
Μια σχέση αναμεσα στην ορατότητα (visibility) και τον συντελεστή εξάλειψης (extinction coefficient) ήταν βασική προκειμένου να συσχετιστεί η ταχύτητα με την οποία κινούνται οι χρήστες με βάση την ορατότητα.

Το Διάγραμμα 1 απεικονίζει τη συσχέτιση της ορατότητας (visibility) και του συντελεστή εξάλειψης (extinction coefficient) (FIT). Από βιβλιογραφικές αναφορές έχει προκύψει ότι μόνο δυο διαγράμματα προσομοιάζουν με τον καλύτερο τρόπο τη μειωμένη ταχύτητα κίνησης των χρηστών σχετικά με την αύξηση της πυκνότητας του καπνού στο χώρο. Πρόκειται για το Διάγραμμα 2 (Technical Report – Part 1 Design Fire Scenarios) και το Διάγραμμα 3 (SFPE, 2016).

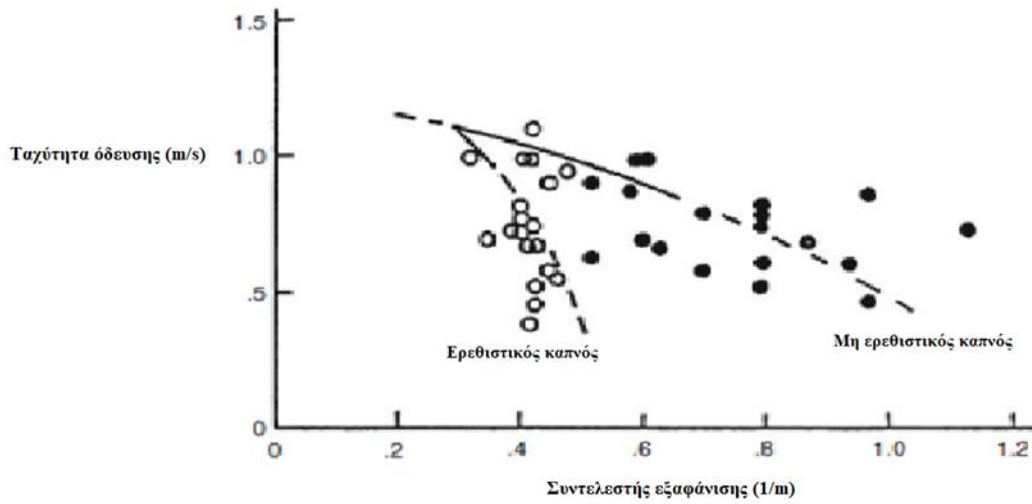
Σύμφωνα με τα διαγράμματα η σύνθεση του καπνού (αν είναι ερεθιστικός (irritant) ή όχι (nonirritant) για τον άνθρωπο) έχει μεγάλη σημασία. Βάση στοιχείων που προκύπτουν από τα διαγράμματα 1, 2 και 3 δημιουργήθηκε το διάγραμμα 4, όπου παρουσιάζεται η μειωμένη ταχύτητα κίνησης των χρηστών σύμφωνα με την ορατότητα σε χώρο με ερεθιστικό καπνό.



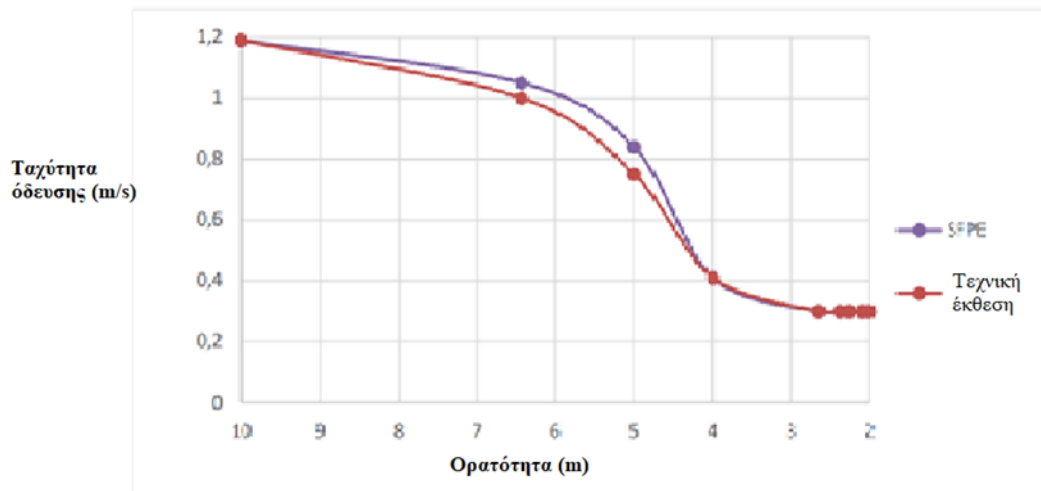
Διάγραμμα 37: Συσχέτιση της ορατότητας (visibility) με το συντελεστή εξάλειψης (extinction coefficient) (FIT 2015).



Διάγραμμα 38: Ταχύτητα κίνησης βάση πυκνότητας καπνού (FIT 2015).



Διάγραμμα 39: Ταχύτητα κίνησης βάση πυκνότητας καπνού (SFPE, 2016).



Διάγραμμα 40: Ταχύτητα κίνησης βάση ορατότητας σε ερεθιστικό καπνό.

3.4 Αερισμός

Η έρευνα πυρκαγιάς από σήραγγες είναι ένας από τους πιο απαιτητικούς τομείς για τους ερευνητές πυρκαγιάς. Παρά τους αυστηρούς κανονισμούς και τις εξελιγμένες μεθόδους αξιολόγησης, τα ατυχήματα συνεχίζουν να συμβαίνουν. Μια σειρά φορτίων πυρκαγιάς που αναμένονται από διαφορετικές αμαξοστοιχίες και διαμορφώσεις σηράγγων ενισχύουν την πολυπλοκότητα της έρευνας. Λόγω της ειδικής δομής των σηράγγων, οι κινήσεις ροής καύσης στο εσωτερικό τους το καθιστούν διαφορετικό σε σχέση με τις φωτιές σε ανοιχτούς χώρους.

Τα τελευταία χρόνια, η μηχανική πυρασφάλειας έχει λάβει μεγαλύτερη προσοχή μεταξύ των ερευνητών λόγω του αυξανόμενου αριθμού καταστροφικών πυρκαγιών σε σήραγγες και του αυξανόμενου αριθμού κατασκευών τούνελ. Ένα σημαντικό ερώτημα στο σχεδιασμό των κατασκευών σήραγγας μεταξύ ειδικών στη σήραγγα και άλλων μερών που εξετάστηκε είναι ο τύπος αερισμού που θα μπορούσε να διατηρήσει συνθήκες χωρίς καπνό. Οι σχεδιαστές χρησιμοποιούν συνήθως διαφορετικούς τύπους εξαερισμού, συμπεριλαμβανομένου του διαμήκου, φυσικού και εγκάρσιου αερισμού. Αυτά επιλέγονται σύμφωνα με το κόστος εγκατάστασης και λειτουργίας και το επιθυμητό επίπεδο ασφάλειας. Όταν μια πυρκαγιά ξεσπά σε μια σήραγγα, εξαπλώνεται σε κατευθύνσεις προς τα άνω και κάτω. Η ροή καπνού που εξαπλώνεται στην αντίθετη πλευρά ονομάζεται backlayering και μία ελάχιστη ταχύτητα εξαερισμού που θα μπορούσε να εξαλείψει τους καπνούς ονομάζεται κρίσιμη ταχύτητα. Αυτές οι δύο παράμετροι έχουν διερευνηθεί ευρέως τα τελευταία χρόνια.

Υπάρχουν πολλοί ερευνητές που διερευνούν την κρίσιμη ταχύτητα και το backlayering πειραματικά. Ωστόσο, αυτή η παράμετρος έχει επίσης διεξαχθεί αριθμητικά, όπως η μελέτη του Khaksari, η οποία αφορούσε προσομοίωση δυναμικού ρευστού (CFD) μιας απροσδόκητης πυρκαγιάς που συνέβη σε σήραγγα μονής κατεύθυνσης μαζικής σιδηροδρομικής μεταφοράς (MRT). Οι ερευνητές διερευνούν την επίδραση διαφόρων εξαναγκασμένων ταχυτήτων εξαερισμού στην κατανομή της θερμοκρασίας και τη διαστρωμάτωση των ρύπων για την εκτίμηση της κρίσιμης ταχύτητας (Haddad, Maluk, Reda, & Harun, 2019).

3.4.1 Κρίσιμη ταχύτητα

Ένα από τα βασικά επιστημονικά προβλήματα, όταν εκδηλώνεται πυρκαγιά σε σήραγγα, είναι η προδιαγραφή της διαμήκου ταχύτητας εξαερισμού που είναι απαραίτητη για την αποτροπή της κίνησης των προϊόντων καύσης προς τα άνω. Μέχρι στιγμής, η τιμή της κρίσιμης ταχύτητας για διάφορες σήραγγες έχει ληφθεί κυρίως από σύνολα εξισώσεων που προέρχονται από την εφαρμογή της διατήρησης του αριθμού Froude, σε συνδυασμό με πειραματικά δεδομένα. Ο αριθμός Froude είναι ο λόγος των δυνάμεων αδράνειας προς τη δύναμη της βαρύτητας. Έχουν επίσης αναφερθεί εκτεταμένα έργα στη βιβλιογραφία που χαρακτηρίζουν την κρίσιμη ταχύτητα εξαερισμού.

Η τεχνική διατήρησης αριθμού Froude εφαρμόστηκε στον Thomas για να μελετήσει την επίδραση της ταχύτητας εξαερισμού στη ροή της φωτιάς σε υπόγειες σήραγγες. Ο Thomas ερεύνησε το λοφίο πυρκαγιάς σε ορισμένα μοντέλα πλήρους και μικρής κλίμακας και παρουσίασε τη γενική ιδέα της κρίσιμης ταχύτητας στη ροή των σπράγγων, υποθέτοντας ότι ο αριθμός Froude ισούται με τη μονάδα. Στη μελέτη των Haddad et al., η κρίσιμη ταχύτητα ορίζεται ως η διαμήκης ταχύτητα που απαιτείται για την εξάλειψη της επίστρωσης του θερμού αερίου και ακολουθεί την ημιεμπειρική εξίσωση (Haddad, Maluk, Reda, & Harun, 2019):

$$U_c = k \left(\frac{gQ'}{\rho_o C_p T} \right)^{1/3}$$

Όπου,

- U_c : η κρίσιμη ταχύτητα, η οποία μπορεί να εξαλείψει τη ροή καπνού,
- g : η επιτάχυνση της βαρύτητας,
- Q' : ο ρυθμός μεταφοράς θερμότητας (HRR) ανά μονάδα πλάτους της σήραγγας,
- ρ_o : η ειδική θερμική ικανότητα του αέρα,
- k : σταθερά και ίση με τη μονάδα,
- T : η θερμοκρασία του καπνού.

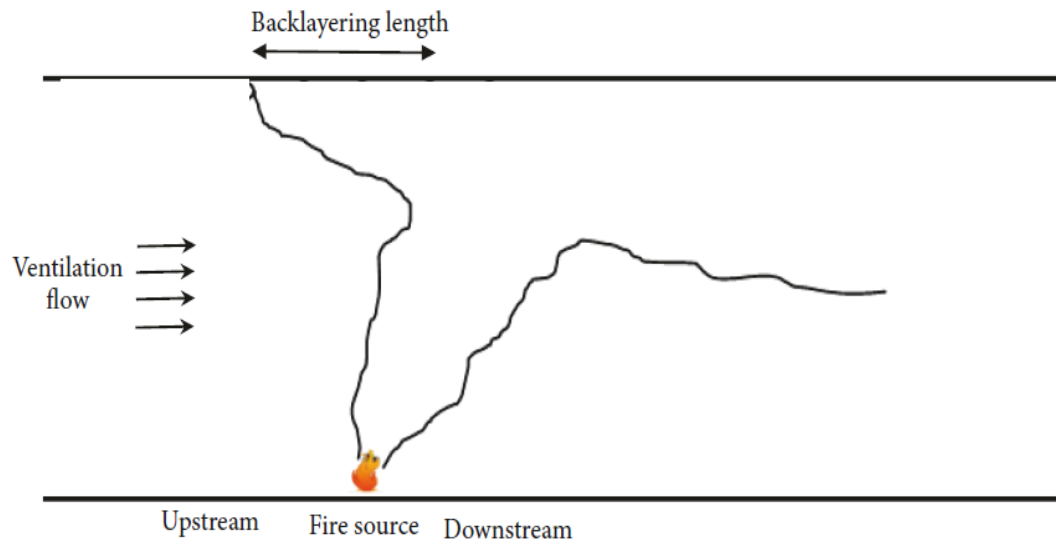
Σημειώνεται ότι η παραπάνω ημιεμπειρική εξίσωση ισχύει και για ορθογώνια διατομή σήραγγας (Haddad et al., 2019).

3.4.2 Backlayering

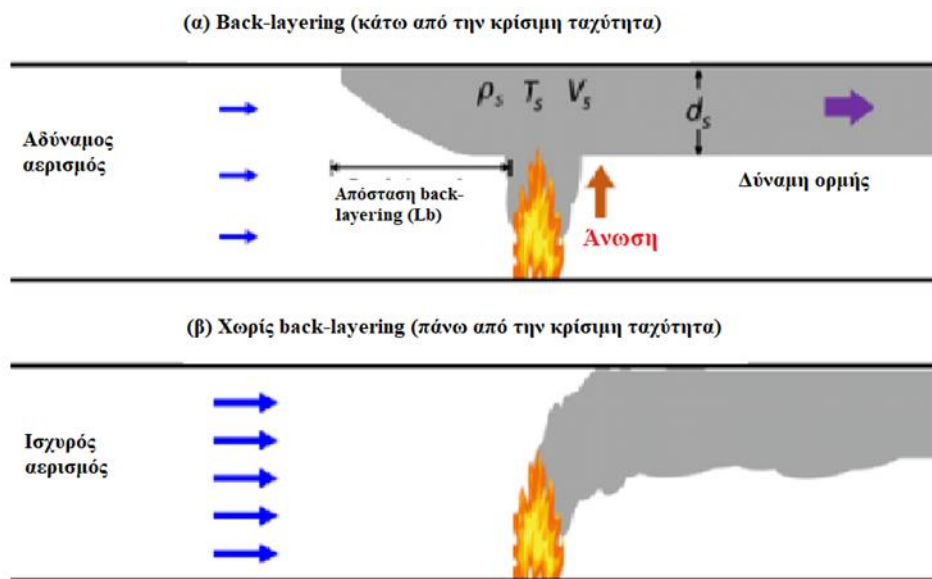
Το μήκος της οπίσθιας στρώσης ή backlayering ορίζεται ως το μήκος της αντίστροφης ροής καπνού προς τα πάνω, όταν η ταχύτητα εξαερισμού είναι χαμηλότερη από αυτή της κρίσιμης ταχύτητας. Αυτό παρουσιάζεται στο παρακάτω διάγραμμα. Ένα από τα πιο σημαντικά ερωτήματα στο σχεδιασμό του συστήματος εξαερισμού των σπράγγων είναι η διαμήκης ταχύτητα εξαερισμού σε σύγκριση με την κρίσιμη τιμή, δηλαδή, πόσο μακριά θα μπορούσαν οι καπνοί και τα αέρια να ταξιδέψουν ανάντη από την πηγή πυρκαγιάς. Επομένως, είναι απαραίτητο να κατανοήσουμε τα χαρακτηριστικά των θερμικών αναθυμιάσεων στο πίσω μέρος σε περίπτωση πυρκαγιάς σε σήραγγα. Παρά το αυξανόμενο ενδιαφέρον για την έρευνα σχετικά με τα χαρακτηριστικά του backlayering τα τελευταία χρόνια, υπήρξε έλλειψη μελετών σχετικά με την κρίσιμη ταχύτητα και τη σχέση της με την απόσταση backlayering.

Ωστόσο, υπόγειοι σταθμοί όπου οι μηχανές με κινητήρα ντίζελ συχνά σταματούν και περνούν σε αυτές διερευνώνται επίσης στην περίπτωση όπου είναι παρόντες οι μηχανικοί και οι σύμβουλοι πυρκαγιάς, όπως η μελέτη του Harun. Η ροή καπνών γύρω

από το κτίριο προσομοιώθηκε αριθμητικά χρησιμοποιώντας το Star-CCM+. Εκτίμησαν αρκετό χρόνο διαφυγής για τους κατοίκους να εκκενώσουν το κτίριο με βάση την κατάσταση εξαερισμού σε αριθμητική προσομοίωση (Haddad et al., 2019).



Εικόνα 5: Μήκος backlayering σε πυρκαγιά σήραγγας κατά τον διαμήκη εξαερισμό (Haddad et al., 2019).



Εικόνα 6: Σχηματικά διαγράμματα της κρίσιμης ταχύτητας για την επίστροψη καπνού. (α) η επίστροψη πίσω γίνεται κάτω από ασθενή αερισμό και (β) ο καπνός παραμένει στη μία πλευρά της φωτιάς υπό ισχυρό αερισμό.

3.4.3 Έγκαιρη εκκένωση - Νομοθεσία

Τα συστήματα εξαερισμού έκτακτης ανάγκης και οι διαδικασίες λειτουργίας σήραγγας αναπτύσσονται για τη μεγιστοποίηση της χρήσης του συστήματος εξαερισμού της οδικής σήραγγας με σκοπό την απομάκρυνση και τον έλεγχο του καπνού και των θερμαινόμενων αερίων που προκύπτουν από καταστάσεις έκτακτης ανάγκης πυρκαγιάς στη σήραγγα. Σε σήραγγες μήκους μικρότερου των 1000 m δεν απαιτείται εξαερισμός έκτακτης ανάγκης, όπου μπορεί να δειχθεί με μηχανική ανάλυση, χρησιμοποιώντας τις παραμέτρους σχεδιασμού για μία συγκεκριμένη σήραγγα (μήκος, διατομή, βαθμός, άνεμος που επικρατεί, κίνηση κατεύθυνση, τύποι φορτίων, σχεδιασμός, μέγεθος πυρκαγιάς κ.λπ.), ώστε το επίπεδο ασφάλειας που παρέχεται από ένα σύστημα μηχανικού εξαερισμού να ισοδυναμεί ή να υπερβαίνεται με την ενίσχυση των μέσων εξόδου, τη χρήση φυσικού αερισμού ή τη χρήση αποθήκευσης καπνού, και επιτρέπεται μόνο όπου έχει εγκριθεί από την αρμόδια αρχή. Ο εξαερισμός έκτακτης ανάγκης πρέπει να έχει μέγεθος ώστε να πληροί τις ελάχιστες απαιτήσεις εξαερισμού με έναν ανεμιστήρα εκτός λειτουργίας ή να παρέχει λειτουργικά μέτρα για να διασφαλίζεται ότι δεν διακυβεύεται η ασφάλεια της ζωής με έναν ανεμιστήρα εκτός λειτουργίας (Meacham, 2017).

Έλεγχος καπνού

Το σύστημα εξαερισμού έκτακτης ανάγκης πρέπει να παρέχει μέσα ελέγχου του καπνού. Σε όλες τις περιπτώσεις, ο επιθυμητός στόχος πρέπει να είναι η παροχή διαδρομής εκκένωσης για τους οδηγούς που εξέρχονται από τη σήραγγα και για τη διευκόλυνση των πυροσβεστικών επιχειρήσεων. Σε σήραγγες με αμφίδρομη κίνηση όπου οι οδηγοί μπορούν να βρίσκονται και στις δύο πλευρές του πυροσβεστικού χώρου, επιτυγχάνονται οι ακόλουθοι στόχοι (Meacham, 2017) :

1. Η διαστρωμάτωση καπνού δεν πρέπει να διαταραχθεί.
2. Η διαμήκης ταχύτητα αέρα διατηρείται σε χαμηλά μεγέθη.
3. Η εξαγωγή καπνού μέσω ανοιγμάτων οροφής ή υψηλών ανοιγμάτων κατά μήκος των τοίχων της σήραγγας είναι αποτελεσματική και πρέπει να λαμβάνεται υπόψη.

Σε σήραγγες με κυκλοφορία μονής κατεύθυνσης όπου οι οδηγοί είναι πιθανό να βρίσκονται ανάντη του χώρου πυρκαγιάς, επιτυγχάνονται οι ακόλουθοι στόχοι (Meacham, 2017) :

Διαμήκη συστήματα

- a) Αποτροπή του backlayering δημιουργώντας μια διαμήκη ταχύτητα αέρα που υπολογίζεται με βάση την κρίσιμη ταχύτητα προς την κατεύθυνση της ροής της κυκλοφορίας.
- b) Αποφυγή της διάσπασης του στρώματος καπνού μη λειτουργώντας ανεμιστήρες τζετ που βρίσκονται κοντά στο σημείο της πυρκαγιάς και χρήση των πιο μακρινών.

Εγκάρσια ή αναστρέψιμα ημι -εγκάρσια συστήματα

- a) Μεγιστοποίηση του ρυθμού εξάτμισης στη ζώνη εξαερισμού που περιέχει τη φωτιά και ελαχιστοποίηση της ποσότητας εξωτερικού αέρα που εισάγεται από ένα εγκάρσιο σύστημα.
- b) Δημιουργία μιας διαμήκουσ ροής αέρα προς την κατεύθυνση της ροής κυκλοφορίας, λειτουργώντας τις ανάντη ζώνες εξαερισμού στη μέγιστη παροχή και τις κατάντη ζώνες εξαερισμού στη μέγιστη εξάτμιση.

Στόχοι Σχεδιασμού

Οι σχεδιαστικοί στόχοι του συστήματος εξαερισμού έκτακτης ανάγκης είναι ο έλεγχος, η εξαγωγή ή ο έλεγχος και η εξαγωγή καπνού και θερμαινόμενων αερίων ως εξής (Meacham, 2017) :

1. Ένα ρεύμα μη μολυσμένου αέρα παρέχεται στους οδηγούς στη διαδρομή (-ες) εξόδου σύμφωνα με το αναμενόμενο σχέδιο αντιμετώπισης έκτακτης ανάγκης.
2. Οι διαμήκεις ρυθμοί ροής αέρα παράγονται για να αποτρέψουν την επανένταξη καπνού σε μια διαδρομή εξόδου μακριά από πυρκαγιά.

Βάση Σχεδιασμού

Ο σχεδιασμός του συστήματος εξαερισμού έκτακτης ανάγκης βασίζεται σε ένα σενάριο πυρκαγιάς με καθορισμένους ρυθμούς απελευθέρωσης θερμότητας, ρυθμούς απελευθέρωσης καπνού και ρυθμούς απελευθέρωσης μονοξειδίου του άνθρακα, όλα μεταβαλλόμενα ανάλογα με το χρόνο. Η επιλογή του σεναρίου πυρκαγιάς λαμβάνει υπόψη τους επιχειρησιακούς κινδύνους που σχετίζονται με τους τύπους οχημάτων που αναμένεται να χρησιμοποιήσουν τη σήραγγα. Το σενάριο πυρκαγιάς λαμβάνει υπόψη την πυρκαγιά σε μια τοποθεσία όπου η πιο αυστηρή απαίτηση απόδοσης του συστήματος εξαερισμού προβλέπεται από μια μηχανική ανάλυση. Το σχεδιασμό του μεγέθους πυρκαγιάς (ο ρυθμός απελευθέρωσης θερμότητας που παράγεται από οχήματα) χρησιμοποιείται για το σχεδιασμό του συστήματος εξαερισμού έκτακτης ανάγκης. Η επιλογή του σχεδιασμού μεγέθους πυρκαγιάς (ρυθμός απελευθέρωσης θερμότητας) λαμβάνει υπόψη τους τύπους οχημάτων που αναμένεται να χρησιμοποιήσουν τη σήραγγα. Επιπλέον, εξετάζεται η αποτυχία ή η απώλεια διαθεσιμότητας εξοπλισμού εξαερισμού έκτακτης ανάγκης (Meacham, 2017).

Ανεμιστήρες

Οι ανεμιστήρες εξαερισμού σήραγγας, οι κινητήρες τους και όλα τα εξαρτήματα που είναι κρίσιμα για τη λειτουργία του συστήματος κατά τη διάρκεια μιας έκτακτης ανάγκης πυρκαγιάς που μπορούν να εκτεθούν σε αυξημένες θερμοκρασίες από τη φωτιά, πρέπει να έχουν σχεδιαστεί για να παραμένουν σε λειτουργία για τουλάχιστον 1 ώρα σε θερμοκρασία 250°C. Όταν οι σχεδιαστικοί υπολογισμοί που πραγματοποιούνται όπως απαιτείται δείχνουν υψηλότερες θερμοκρασίες. Αυτές οι υψηλότερες θερμοκρασίες χρησιμοποιούνται για την επιλογή εξοπλισμού. Οι ανεμιστήρες εξαερισμού σήραγγας, όπως οι ανεμιστήρες τζετ, που μπορούν να εκτεθούν απευθείας στη φωτιά εντός του δρόμου της σήραγγας θεωρούνται

αναλώσιμοι. Ο σχεδιασμός των συστημάτων εξαερισμού, όπου οι ανεμιστήρες μπορούν να εκτεθούν απευθείας σε πυρκαγιά πρέπει να περιλαμβάνει περιττό ανεμιστήρα. Το σύστημα εξαερισμού έκτακτης ανάγκης πρέπει να είναι σε θέση να φτάσει σε πλήρη κατάσταση λειτουργίας εντός 180 δευτερολέπτων το πολύ από την ενεργοποίηση. Οι αναστρέψιμοι ανεμιστήρες πρέπει να μπορούν να ολοκληρώσουν την πλήρη περιστροφή της αναστροφής εντός 90 δευτερολέπτων. Τα ανοίγματα εκκένωσης και εξόδου για τους ανεμιστήρες έκτακτης ανάγκης πρέπει να τοποθετούνται μακριά από τυχόν ανοίγματα εισαγωγής αέρα παροχής για να αποφευχθεί η επανακυκλοφορία (Meacham, 2017).

Αποσβεστήρες

Όλοι οι αποσβεστήρες, οι ενεργοποιητές και τα παρελκόμενα που εκτίθενται στην αυξημένη ροή αέρα εξάτμισης από τη φωτιά στο οδόστρωμα πρέπει να έχουν σχεδιαστεί για να παραμένουν πλήρως λειτουργικά σε θερμοκρασία ροής αέρα 250 °C (482 °F) για τουλάχιστον 1 ώρα. Όταν οι σχεδιαστικοί υπολογισμοί που πραγματοποιούνται όπως απαιτείται δείχνουν υψηλότερες θερμοκρασίες, αυτές οι υψηλότερες θερμοκρασίες χρησιμοποιούνται για την επιλογή εξοπλισμού. Όλα τα κινούμενα και άλλα κρίσιμα εξαρτήματα του αποσβεστήρα πρέπει να σχεδιάζονται ώστε να επιτρέπουν τη διαστολή και τη συστολή σε όλο το μέγιστο αναμενόμενο εύρος θερμοκρασίας. Τα ρουλεμάν αποσβεστήρων πολλαπλών λεπίδων πρέπει να βρίσκονται έξω από το ρεύμα αέρα. Οι ενεργοποιητές και τα έδρανα πρέπει να απομονώνονται από το θερμαινόμενο ρεύμα αέρα. Όλοι οι άλλοι αποσβεστήρες που έχουν σχεδιαστεί για χρήση σε περίπτωση έκτακτης ανάγκης πυρκαγιάς πρέπει να είναι εξοπλισμένοι με ενεργοποιητές ισχύος που μπορούν να ελεγχθούν χειροκίνητα ή αυτόματα (Meacham, 2017).

Ηχητικοί εξασθενητές

Οι ηχητικοί εξασθενητές που βρίσκονται στο υπερυψωμένο ρεύμα αέρα από το οδόστρωμα, όπως αυτοί που χρησιμοποιούνται σε ημι-εγκάρσια συστήματα εξάτμισης και πλήρως εγκάρσιους αγωγούς εξάτμισης, πρέπει να μπορούν να αντέχουν σε θερμοκρασία ροής αέρα 250 °C. Όταν οι σχεδιαστικοί υπολογισμοί που πραγματοποιούνται όπως απαιτείται δείχνουν υψηλότερες θερμοκρασίες, αυτές οι υψηλότερες θερμοκρασίες χρησιμοποιούνται για την επιλογή εξοπλισμού. Όλα τα συστατικά του εξασθενητή παραμένουν δομικά άθικτα και στη θέση τους μετά την απαιτούμενη 1 ώρα λειτουργίας. Το ηχοαπορροφητικό υλικό πλήρωσης που χρησιμοποιείται στα διαφράγματα πρέπει να είναι μη εύφλεκτο, μη τοξικό και σταθερό στις θερμοκρασίες (Meacham, 2017).

Έλεγχοι

Οι ανεμιστήρες πρέπει να είναι τοπικά ελεγχόμενοι, εκτός από οποιοδήποτε αυτόματο ή τηλεχειριστήριο, ώστε ο χειρισμός του εξοπλισμού να γίνεται χειροκίνητα. Όταν τόσο τα τοπικά όσο και τα τηλεχειριστήρια παρέχουν τη δυνατότητα λειτουργίας των ανεμιστήρων σε κατάσταση έκτακτης ανάγκης, ο τοπικός έλεγχος πρέπει να μπορεί να υπερισχύει του τηλεχειριστηρίου. Σημειώνεται ότι ο τοπικός έλεγχος είναι οι συσκευές μεταγωγής στο χειριστήριο του κινητήρα (Meacham, 2017).

Διείσδυση εύφλεκτων και εύφλεκτων υγρών

Η πρόληψη της τυχαίας διείδυσης εύφλεκτων και εύφλεκτων υγρών λόγω διαρροών πρέπει να παρέχεται. Ακόμη, οι άξονες εξαερισμού ή ανεμιστήρων που χρησιμοποιούνται για εξαερισμό τούνελ δεν πρέπει να τερματίζουν σε βαθμό σε οποιοδήποτε οδόστρωμα οχημάτων. Επιπλέον οι άξονες εξαερισμού και ανεμιστήρων επιτρέπεται να τερματίζουν στις διάμεσες λωρίδες διαιρεμένων αυτοκινητοδρόμων, σε πεζοδρόμια σχεδιασμένα για να δέχονται τέτοιους άξονες ή σε ανοιχτούς χώρους, υπό την προϋπόθεση ότι οι ακόλουθες συνθήκες πληρούνται (Meacham, 2017) :

1. Το επίπεδο βαθμού της διάμεσης λωρίδας, πεζοδρομίου ή υπαίθριου χώρου βρίσκεται σε υψηλότερο υψόμετρο από το επίπεδο βαθμού περιβάλλοντος.
2. Το επίπεδο βαθμού της διάμεσης λωρίδας, πεζοδρομίου ή υπαίθριου χώρου χωρίζεται από το οδόστρωμα με ένα τσιμεντένιο κράσπεδο ύψους τουλάχιστον 152,4 mm.

Παρακάτω αναφέρονται οι παράγοντες που θα πρέπει να ληφθούν υπόψη για τη διατήρηση ενός βιώσιμου περιβάλλοντος για περιόδους μικρής διάρκειας. Αυτοί οι παράγοντες είναι η επίδραση της θερμότητας, ο σκοτεινός καπνός, το μονοξείδιο του άνθρακα και η ταχύτητα και αναφέρονται στον παρακάτω πίνακα.

Πίνακας 9: Παράγοντες που θα πρέπει να ληφθούν υπόψη για τη διατήρηση ενός περιβάλλοντος με βιωσιμότητα για περιόδους μικρής διάρκειας (Ventilation, 2015).

Κριτήρια	Τιμές			
Επίδραση θερμότητας	Κορεσμένος αέρας με υδρατμούς <60 °C			
	<2,5 kW/m ² για χρονικά διαστήματα έως 30 λεπτά			
Μονοξείδιο του άνθρακα	Μέγιστο (λίγα δευτερόλεπτα)	Μέσος όρος (πρώτα 6 λεπτά από έκθεση)	Μέσος όρος (πρώτα 15 λεπτά από έκθεση)	Υπόλοιπο έκθεσης
	≤2000 ppm	≤1500 ppm	≤800 ppm	≤50 ppm
Σκίαση καπνού	Σήμα 80 lux διακριτό στα 30 μ			
	Τοίχοι και πόρτες διακρίνονται στα 10 m			
Ταχύτητα	≤ 11,1 m/s ταχύτητα αέρα κατά μήκος οποιασδήποτε διαδρομής έκτακτης ανάγκης			
Ύψος	1,8 m πάνω από το δάπεδο στην προστατευμένη διαδρομή			

Κεφάλαιο 4 : Προσομοίωση σεναρίων στο Pyrosim

Το πρόγραμμα PyroSim είναι ένα γραφικό περιβάλλον για τον χρήστη (Graphical User Interface), το οποίο τρέχει το πρόγραμμα FDS (Fire Dynamics Simulator), δίνοντας έτσι την δυνατότητα να προβλεφθούν οι συγκεντρώσεις του καπνού, του μονοξειδίου

του άνθρακα (CO) και άλλων ουσιών κατά την διάρκεια μιας πυρκαγιάς, όπως επίσης και τα προφίλ των θερμοκρασιών για έναν χώρο. Επίσης το Pyrosim έχει το πρόγραμμα Smokeview είναι ένα ξεχωριστό πρόγραμμα οπτικοποίησης, που χρησιμοποιείται για την παρουσίαση των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης του FDS (“Pyro Sim Manual | PDF |,” n.d.).

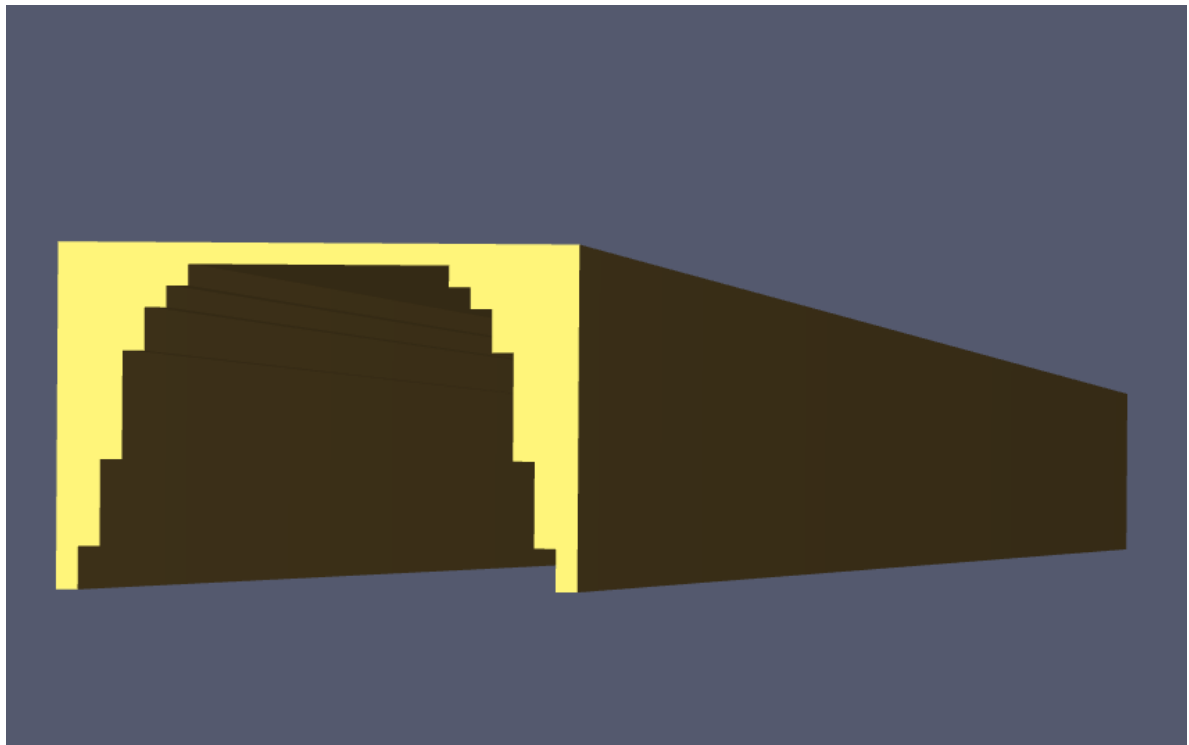
4.1 Σχεδιασμός και χαρακτηριστικά σήραγγας

Σε σιδηροδρομική σήραγγα διπλής τροχιάς 1200m μήκος η διατομή είναι πεταλοειδούς μορφής με τα εξής χαρακτηριστικά (εικόνα 6):

Μήκος: 1200 m

Πλάτος: 12 m

Ύψος: 8 m



Εικόνα 7: Σχεδιασμός σήραγγας.

Το βαγόνι είναι τοποθετημένο στα 650m της σήραγγας.

Χαρακτηριστικά βαγονιού:

Μήκος: 16 m

Πλάτος: 3 m

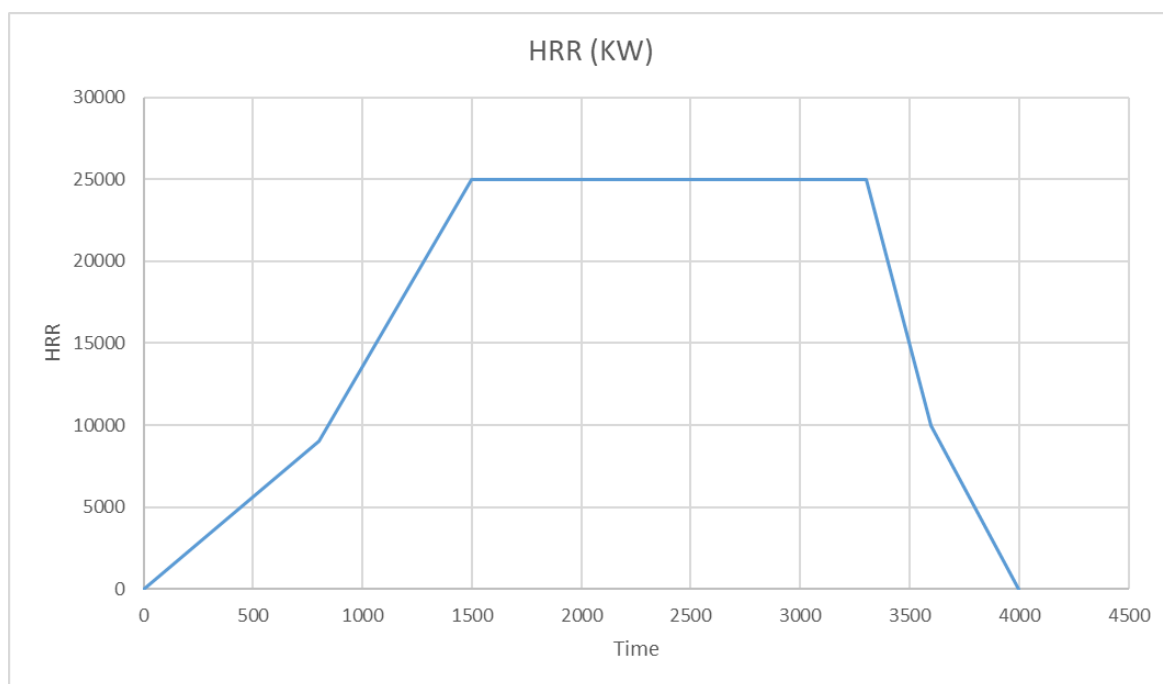
Ύψος: 4 m

Χαρακτηριστικά φωτιάς είναι τα εξής:

- Reactions (χημικός τύπος πολυουρεθάνης)

Composition: C-1, H-1.7, O-0.3

- Byproducts: Specific heat of combustion (ρυθμός έκλυσης της ενέργειας από καθορισμένη θερμοκρασία καύσης αποδώσεις μονοξειδίου του άνθρακα)- 23000 kJ/Kg
- Heat Release Rate Per Unit Area (ρυθμός έκλυσης της θερμότητας ανά μονάδα επιφάνειας): 520,833 kW/m²



Διάγραμμα 41: Παραγωγή θερμότητας φωτιάς βάσει χρόνου.

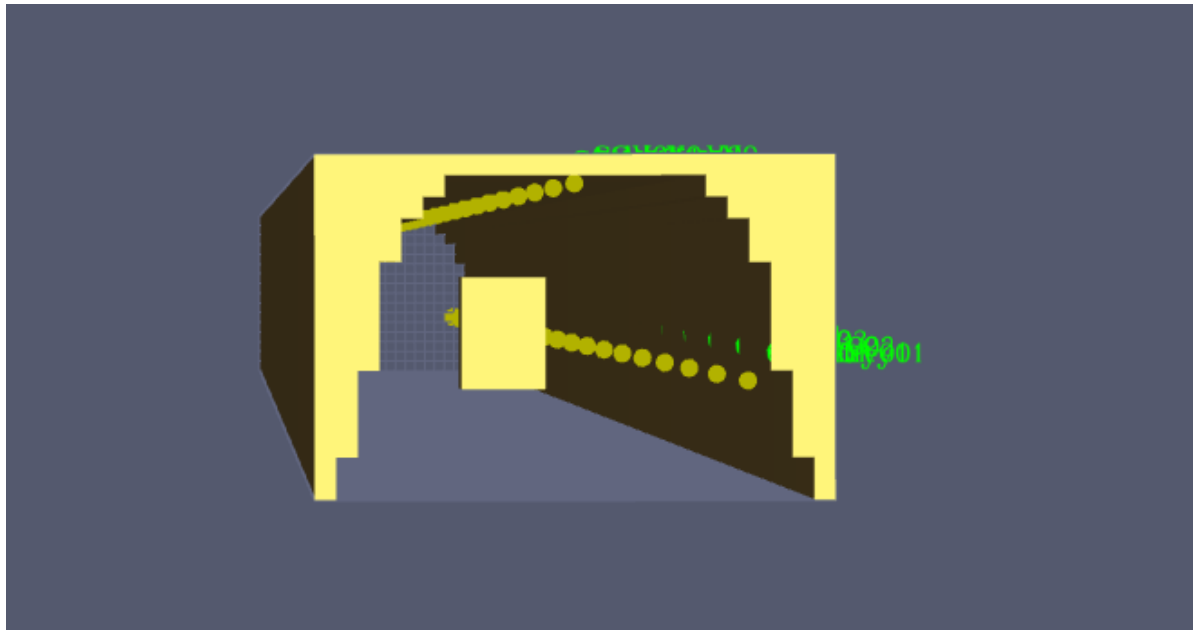
Devices

Devices (συσκευές): είναι εικονικές συσκευές που χρησιμοποιούνται σε οποίο σημείο του μοντέλου θέλουμε για καταγραφή ποσοτήτων διάφορων παραμέτρων της ανάλυσης και για πιο συνθέτες συσκευές όπως ανιχνευτές καπνού.

Στη παρούσα εργασία τα devices τα τοποθετούμε στο κέντρο της σήραγγας κάτω από την οροφή και στην όδευση διαφυγής. Η απόσταση των devices μεταξύ τους είναι 60 m και μετράνε τα εξής χαρακτηριστικά:

Devices

- Θερμοκρασία (Temperature)
- Ορατότητα (Visibility)
- Μονοξείδιο του άνθρακα (CO)



Εικόνα 8: Τοποθέτηση devices στην όδευση διαφυγής και στο κέντρο κάτω από την οροφή της σήραγγας.

2D Slices

Τα Slices μετράνε gas-phase δεδομένα (πίεση, ταχύτητα, θερμοκρασία, συγκέντρωση σωματιδίων κ.α.) πάνω σε έναν επίπεδο ευθυγραμμισμένο άξονα που είναι παράλληλος σε έναν από τους άξονες x ή y ή z . Επίσης αυτά τα δεδομένα μπορούν να αποτυπωθούν και να αναπαραχθούν από ένα αρχείο Smokeview.

Στη παρούσα εργασία τοποθετούμε τα 2D slices σε διάφορες θέσεις (εικόνα 8) έτσι ώστε τρέχοντας το fds θα εμφανίσει προσομοίωση τα χαρακτηριστικά που ορίσαμε στο Smokeview.

	XYZ Plane	Plane Value	Gas Phase Quantity	Use Vector?	Cell Centered?
1	Z	1,7 m	[Species: CARBON MONOXIDE] Volume Fraction	NO	NO
2	Z	1,7 m	Temperature	NO	NO
3	Z	1,7 m	Visibility	NO	NO
4	Z	1,7 m	Velocity	YES	NO
5	Y	12,0 m	Velocity	YES	NO
6	X	658,0 m	Temperature	NO	NO
7	Y	12,0 m	Temperature	NO	NO
8	X	658,0 m	Visibility	NO	NO
9	Y	12,0 m	Visibility	NO	NO
10	X	658,0 m	[Species: CARBON MONOXIDE] Volume Fraction	NO	NO
11	Y	12,0 m	[Species: CARBON MONOXIDE] Volume Fraction	NO	NO
12	Y	10,0 m	Temperature	NO	NO
13	Y	10,0 m	Velocity	YES	NO
14	Y	10,0 m	Visibility	NO	NO
*					

Insert Row

Remove Row

Move Up

Move Down

Copy

Paste

Cut

OK

Cancel

Εικόνα 9: Εισαγωγή διάφορων θέσεων 2D slices

Στο Smokeview εμφανίζονται τα 2D slices στις θέσεις που έχουμε ορίσει βλέποντας έτσι πως επηρεάζονται από την φωτιά και τον καπνό στο ύψος και θέση που τοποθετήσαμε. Σκοπός των SLICES και DEVICES είναι να κατανοηθεί και να αποτυπωθεί πιο ευκολά η εξάπλωσή του καπνού στο χώρο της σήραγγας.

Αερισμός

Οι συνθήκες του αέρα στη σιδηροδρομική σήραγγα υπάρχουν εκ των προτέρων δηλαδή ο αέρας δεν μπήκε ούτε με διάφορα πίεσης ούτε με κάποιον ανεμιστήρα. Θεωρήσαμε ότι υπάρχει ταχύτητα αέρα στις αρχικές συνθήκες 20° C η οποία παραμένει σταθερή καθ' όλη την διάρκεια της προσομοίωσης. Με αποτέλεσμα την επιρροή των συνθήκων του αέρα που υπάρχουν στην προσομοίωση.

Έτσι, λαμβάνοντας υπόψη την κρίσιμη ταχύτητα (critical velocity) εξετάστηκαν 5 εναλλακτικά σενάρια από 0 m/s έως 4 m/s. Ανάλογα με την διατομή της σήραγγας η κρίσιμη ταχύτητα (critical velocity) είναι μέχρι 3,5 m/s.

4.2 Σενάρια

Σκοπός δημιουργίας των σεναρίων είναι η μελέτη επίδρασης της ταχύτητας του αέρα εντός σιδηροδρομικής σήραγγας στην υγεία των επιβατών σε περίπτωση εκδήλωσης πυρκαγιάς. Η φωτιά που ξεσπά στο μέσο της σιδηροδρομικής σήραγγας οφείλεται σε ηλεκτρολογική βλάβη του βαγονιού με αποτέλεσμα την άμεση εκκένωση των επιβαινόντων. Τα προβλήματα της εκκένωσης ξεκινούν από την στιγμή που οι άνθρωποι μόλις αντιληφθούν την φωτιά προσπαθούν να εγκαταλείψουν το βαγόνι που φλέγεται. Αυτό συμβαίνει διότι με το που βγουν από το βαγόνι δεν έχουν καλή ορατότητα λόγω του καπνού που δημιουργείται στη σήραγγα την συγκεκριμένη στιγμή. Μετέπειτα ο καπνός που εισπνέουν επηρεάζει την υγεία των ανθρώπων όπως και η θερμοκρασία που δημιουργείται λόγω της φωτιάς όσο περνάει ο χρόνος τόσο χειροτερεύει με αποτέλεσμα την άμεση χρονική αντιμετώπιση της εκκένωσης. Ακριβώς για αυτούς τους λόγους πραγματοποιήθηκε προσομοίωση διαφορετικών σεναρίων που έχουν να κάνουν με τον αέρα που φυσάει προς την διαδρομή αποφυγής των επιβατών. Ακριβέστερα, τα αποτελέσματα που θα προκύψουν όταν η ταχύτητα αέρα είναι 0 m/s ή όταν έχουμε μια κίνηση του αέρα μέσα στη σήραγγα. Τα σενάρια είναι τα εξής (Πίνακας 9):

Πίνακας 10: Χαρακτηριστικά σεναρίων

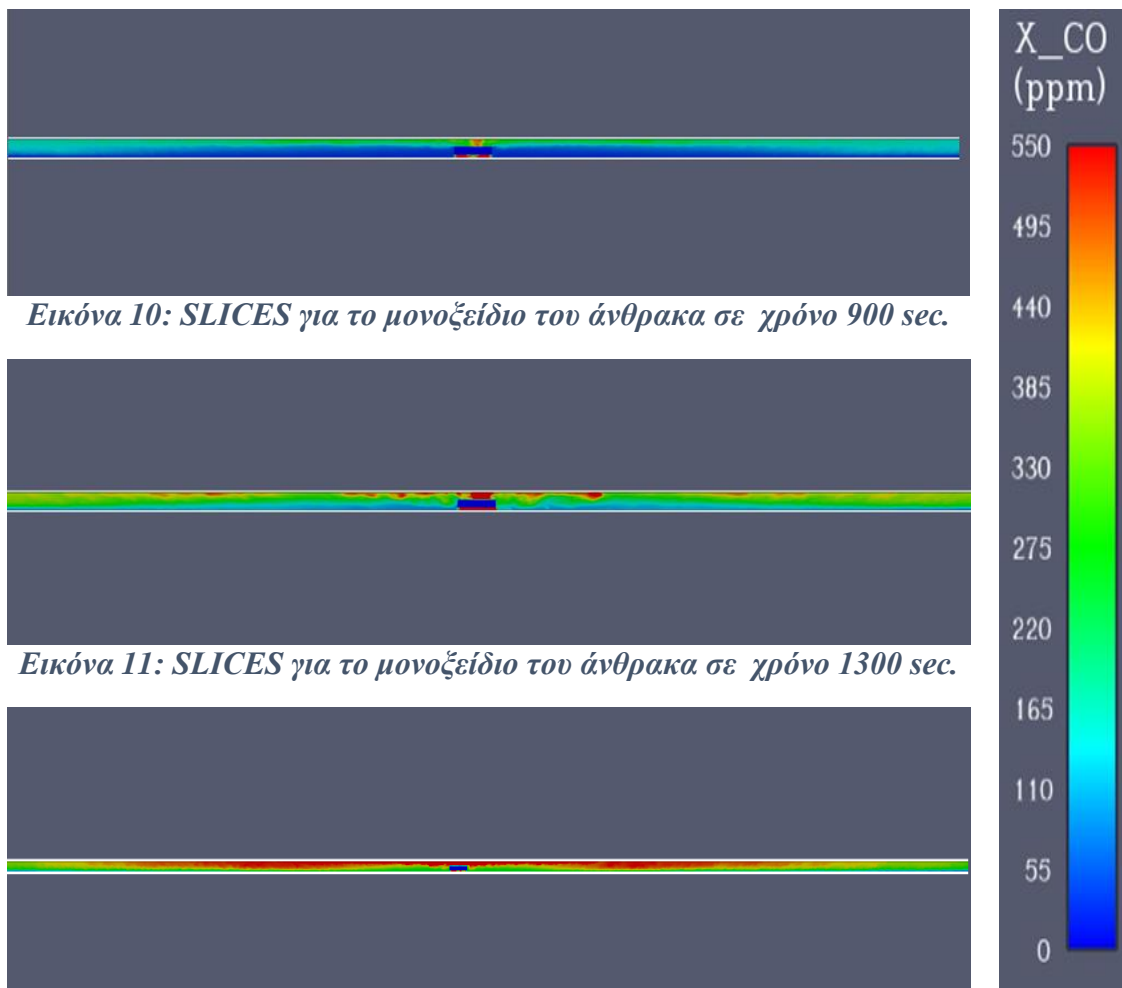
Σενάρια	Αερισμός
Σενάριο 1	0 m/s
Σενάριο 2	1 m/s
Σενάριο 3	2 m/s
Σενάριο 4	3 m/s
Σενάριο 5	4 m/s

4.2.1 Σενάριο 1

Στο πρώτο σενάριο η ταχύτητα του αέρα είναι 0 m/s.

Τα SLICES που χρησιμοποιήθηκαν είναι για τη μέτρηση του μονοξειδίου του άνθρακα, της ορατότητας και της θερμοκρασίας.

Στην (Εικόνα 9) παρουσιάζονται τα SLICES για το μονοξείδιο του άνθρακα. Παρατηρείται ότι από 900 sec οι τιμές του μονοξειδίου του άνθρακα αυξάνονται στην οροφή της σήραγγας και στη συνέχεια με το πέρασμα του χρόνου στα 1300 sec εξαπλώνονται σταδιακά και στην όδευση διαφυγής (Εικόνα 10). Όπως και στα 1600 sec με το πέρασμα του χρόνου οι τιμές του μονοξειδίου του άνθρακα είναι πολύ υψηλές στην οροφή και στην όδευση διαφυγής (Εικόνα 11).

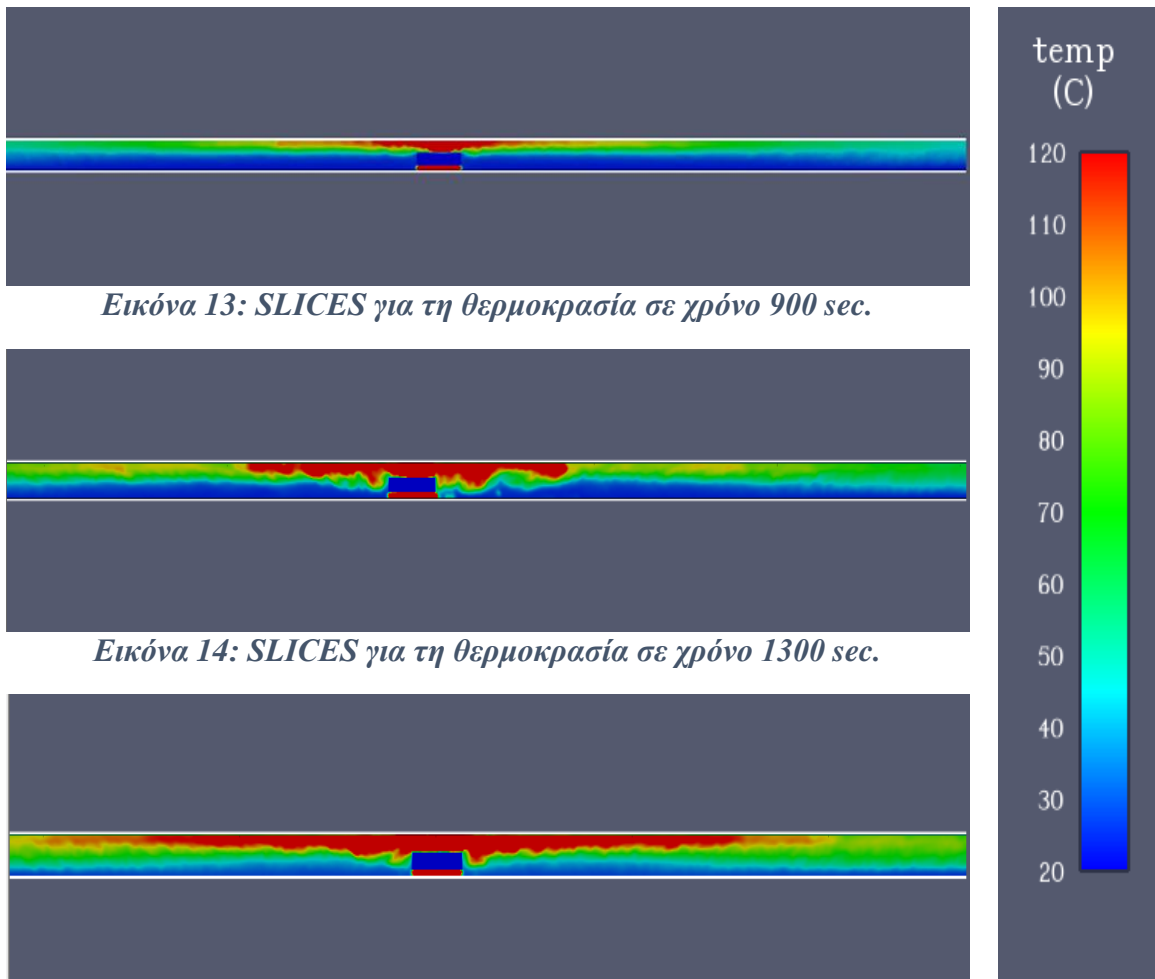


Εικόνα 10: SLICES για το μονοξείδιο του άνθρακα σε χρόνο 900 sec.

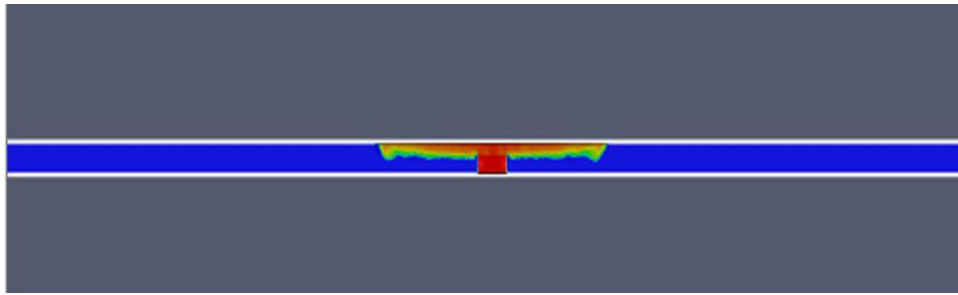
Εικόνα 11: SLICES για το μονοξείδιο του άνθρακα σε χρόνο 1300 sec.

Εικόνα 12: SLICES για το μονοξείδιο του άνθρακα σε χρόνο 1600 sec.

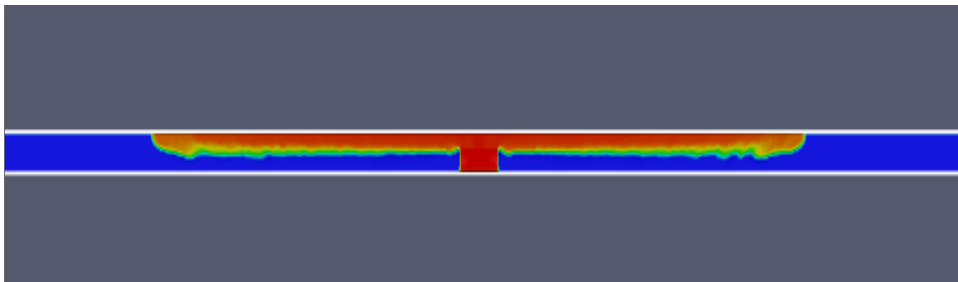
Τα SLICES για την θερμοκρασία παρουσιάζονται στην (Εικόνα 12). Παρατηρείται ότι από 900 sec οι τιμές της θερμοκρασίας αυξάνονται στην οροφή της σήραγγας και στη συνέχεια με το πέρασμα του χρόνου στα 1300 sec εξαπλώνονται σταδιακά και στην όδευση διαφυγής (Εικόνα 13). Ενώ στα 1600 sec με το πέρασμα του χρόνου οι τιμές της θερμοκρασίας είναι πολύ υψηλές στην οροφή και στην όδευση διαφυγής (Εικόνα 14).



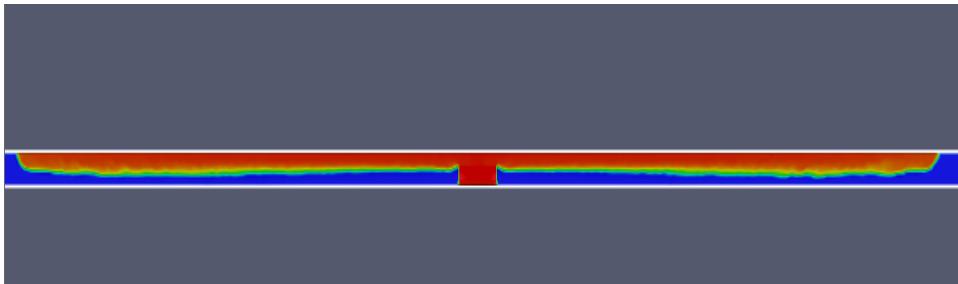
Στην (Εικόνα 15) παρουσιάζονται τα SLICES για την ορατότητα. Παρατηρείται ότι από 90 sec οι τιμές της ορατότητας αυξάνονται στην οροφή της σήραγγας και στη συνέχεια με το πέρασμα του χρόνου στα 120 sec εξαπλώνονται σταδιακά και στην όδευση διαφυγής (Εικόνα 16). Ενώ στα 280 sec με το πέρασμα του χρόνου οι τιμές της ορατότητας είναι πολύ υψηλές στην οροφή και στην όδευση διαφυγής (Εικόνα 17).



Εικόνα 16: SLICES για την ορατότητα σε χρόνο 90sec.



Εικόνα 17: SLICES για την ορατότητα σε χρόνο 180sec.



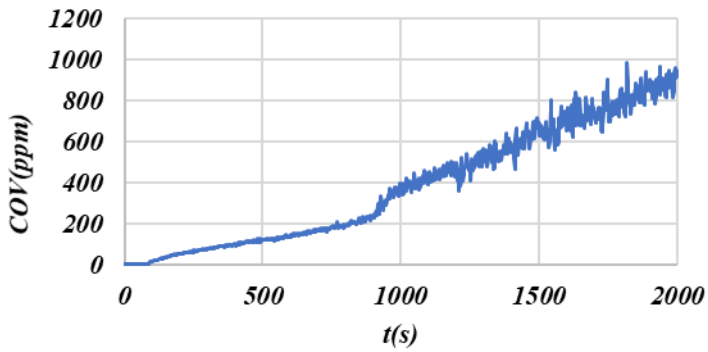
Εικόνα 18: SLICES για την ορατότητα σε χρόνο 260sec.



Από τα DEVICES που τοποθετήθηκαν σε διαφορά κρίσιμα σημεία της σήραγγας όπως στην οροφή της σήραγγας και στην όδευση διαφυγής παρουσιάζονται παρακάτω.

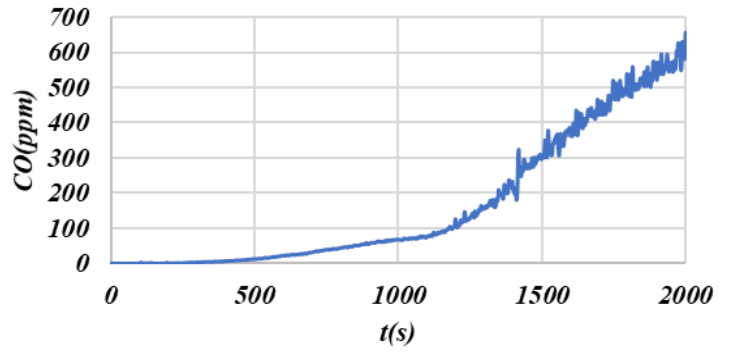
- Σε απόσταση 60 m από την φωτιά παρατηρούνται ότι στα διαγράμματα μονοξειδίου του άνθρακα σε συνάρτηση του χρόνου (Διαγράμματα 6 και 7 αντίστοιχα), οι τιμές COV της οροφής αλλά και το CO της όδευσης διαφυγής αυξάνονται με το πέρασμα του χρόνου. Αντίστοιχα αποτελέσματα λαμβάνονται και από τα διαγράμματα θερμοκρασίας σε συνάρτηση χρόνου (Διαγράμματα 8 και 9 αντίστοιχα). Ποιο συγκεκριμένα στα παραπάνω διαγράμματα παρατηρείται η αύξηση των μελετώμενων τιμών με το πέρασμα του χρόνου. Ενώ στα διαγράμματα της ορατότητας σε συνάρτηση με το χρόνο παρατηρείται η μείωση της ορατότητας με το πέρασμα του χρόνου (Διαγράμματα 10 και 11 αντίστοιχα).

Διάγραμμα COV(ppm)60m-t(s)



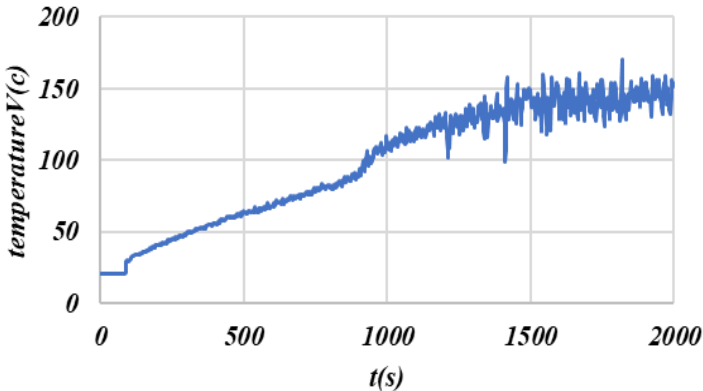
Διάγραμμα 42: Διάγραμμα μονοξείδιο του άνθρακα σε συνάρτηση με το χρόνο, στην οροφή της σήραγγας (απόσταση 60 m).

Διάγραμμα CO(ppm)60m-t(s)



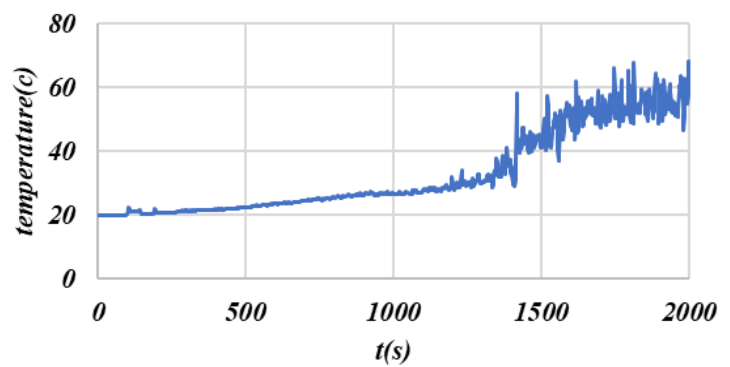
Διάγραμμα 43: Διάγραμμα μονοξείδιο του άνθρακα σε συνάρτηση με το χρόνο, στην όδευση διαφυγής της σήραγγας (απόσταση 60 m).

Διάγραμμα temperatureV(c)60m-t(s)



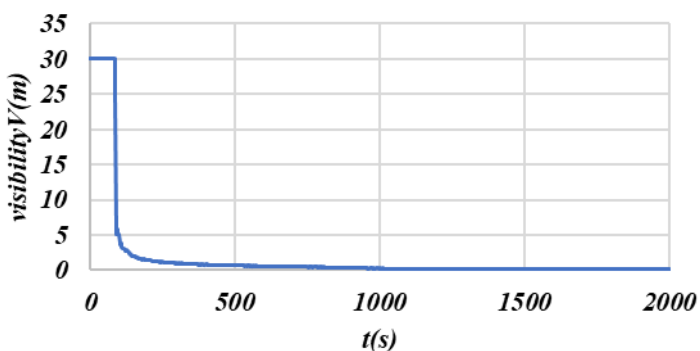
Διάγραμμα 44: Διάγραμμα θερμοκρασίας σε συνάρτηση με το χρόνο, στην οροφή της σήραγγας (απόσταση 60 m).

Διάγραμμα temperature(c)60m-t(s)



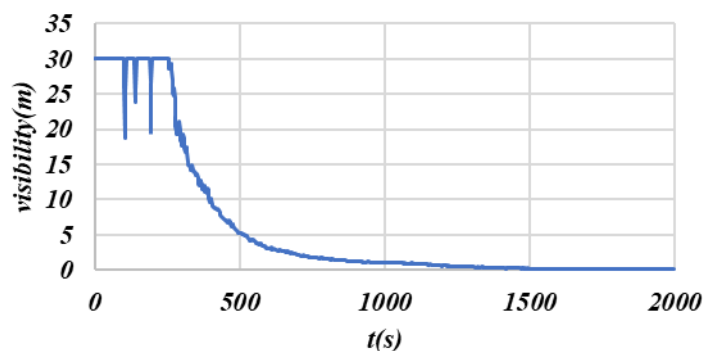
Διάγραμμα 45: Διάγραμμα θερμοκρασίας σε συνάρτηση με το χρόνο, στην όδευση διαφυγή της σήραγγας (απόσταση 60 m).

Διάγραμμα visibilityV(m)60m-t(s)



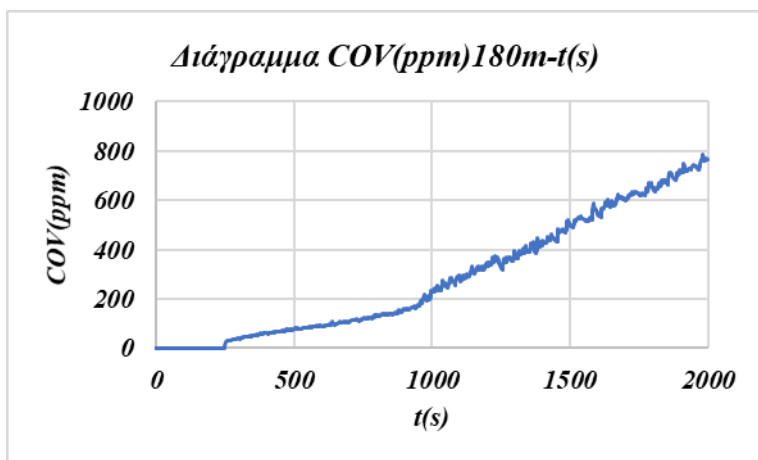
Διάγραμμα 46: Διάγραμμα ορατότητας σε συνάρτηση με το χρόνο, στην οροφή της σήραγγας (απόσταση 60 m).

Διάγραμμα visibility(m)60m-t(s)

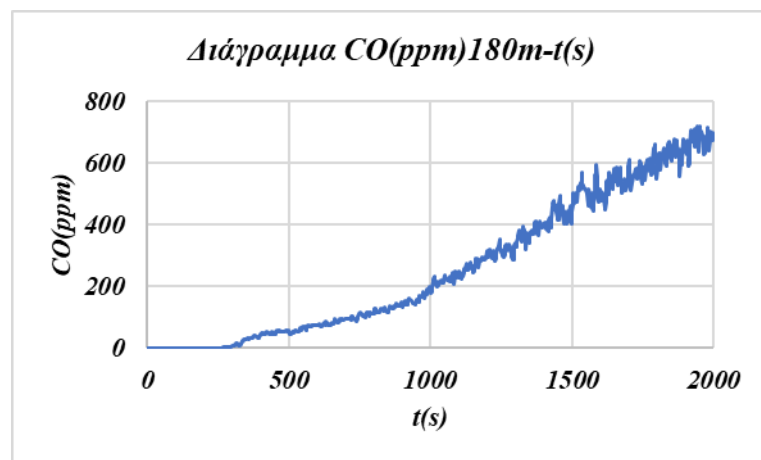


Διάγραμμα 47: Διάγραμμα ορατότητας σε συνάρτηση με το χρόνο, στην όδευση διαφυγή της σήραγγας (απόσταση 60 m).

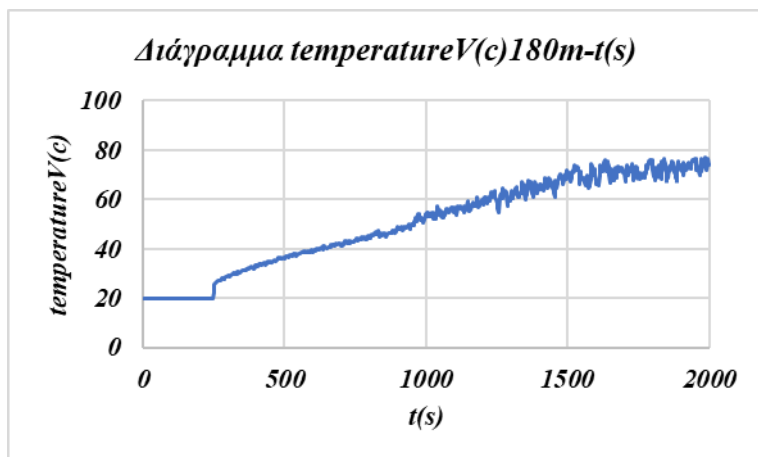
- Σε απόσταση 180 m από την φωτιά παρατηρούνται ότι στα διαγράμματα μονοξειδίου του άνθρακα σε συνάρτησι του χρόνου (Διαγράμματα 12 και 13 αντίστοιχα), οι τιμές COV της οροφής αλλά και το CO της όδευσης διαφυγής αυξάνονται με το πέρασμα του χρόνου. Αντίστοιχα αποτελέσματα λαμβάνονται και από τα διαγράμματα θερμοκρασίας σε συνάρτηση χρόνου (Διαγράμματα 14 και 15 αντίστοιχα). Ποιο συγκεκριμένα στα παραπάνω διαγράμματα παρατηρείται η αύξηση των μελετώμενων τιμών με το πέρασμα του χρόνου. Ενώ στα διαγράμματα της ορατότητας σε συνάρτηση με το χρόνο παρατηρείται η μείωση της ορατότητας με το πέρασμα του χρόνου (Διαγράμματα 16 και 17 αντίστοιχα).



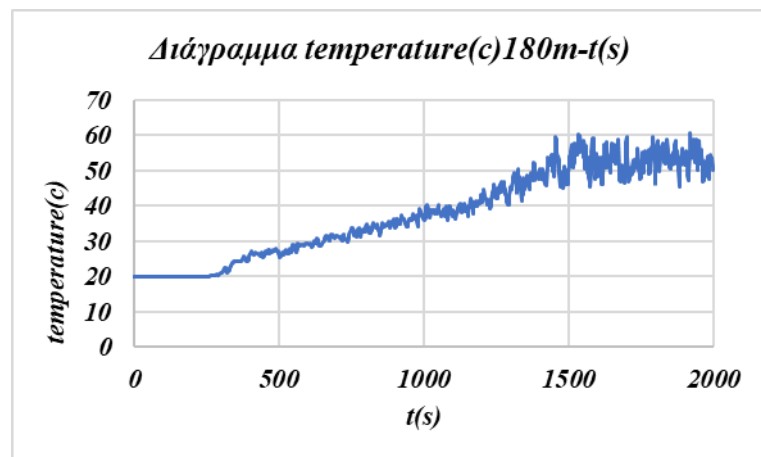
Διάγραμμα 48: Διάγραμμα μονοξειδίου του άνθρακα σε συνάρτηση με το χρόνο, στην οροφή της σήραγγας (απόσταση 180 m).



Διάγραμμα 49: Διάγραμμα μονοξειδίου του άνθρακα σε συνάρτηση με το χρόνο, στην όδευση διαφυγής της σήραγγας (απόσταση 180 m).

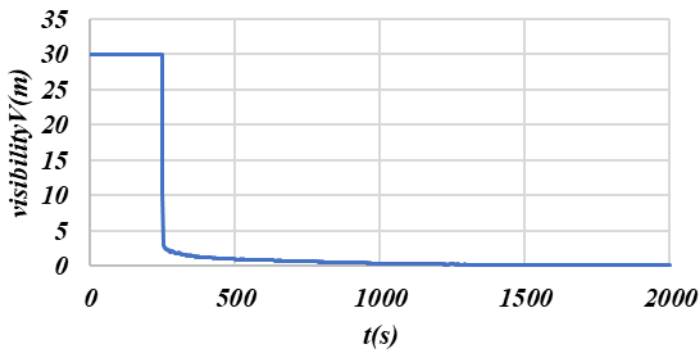


Διάγραμμα 50: Διάγραμμα θερμοκρασίας σε συνάρτηση με το χρόνο, στην οροφή της σήραγγας (απόσταση 180 m).



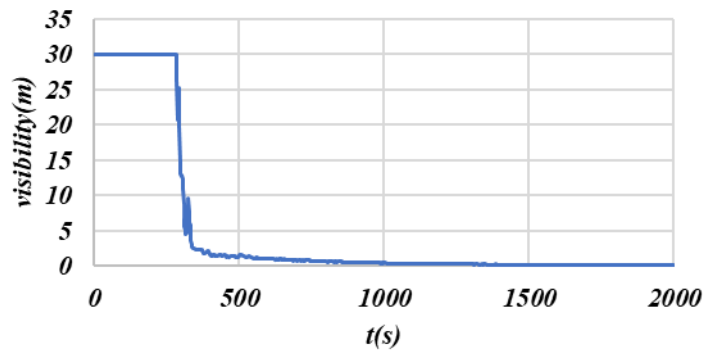
Διάγραμμα 51: Διάγραμμα θερμοκρασίας σε συνάρτηση με το χρόνο, στην όδευση διαφυγής της σήραγγας (απόσταση 180 m).

Διάγραμμα $visibilityV(m)180m-t(s)$



Διάγραμμα 52: Διάγραμμα ορατότητας σε συνάρτηση με το χρόνο, στην οροφή της σήραγγας (απόσταση 180 m).

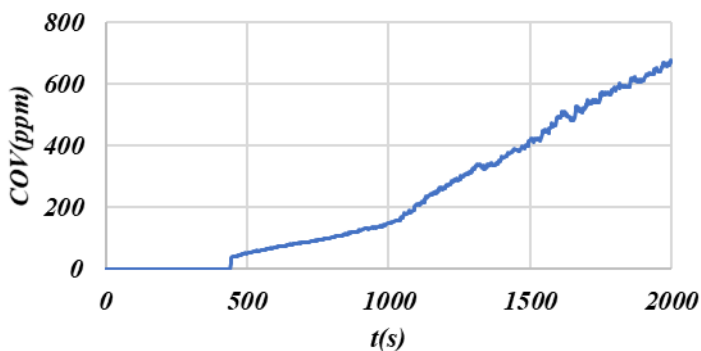
Διάγραμμα $visibility(m)180m-t(s)$



Διάγραμμα 53: Διάγραμμα ορατότητας σε συνάρτηση με το χρόνο, στην όδευση διαφυγής της σήραγγας (απόσταση 180 m).

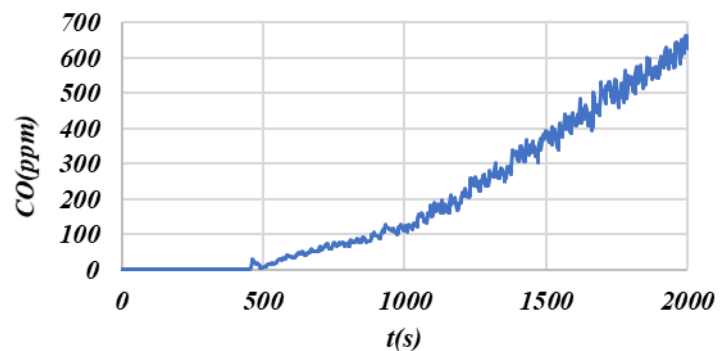
- Σε απόσταση 300 m από την φωτιά παρατηρούνται ότι στα διαγράμματα μονοξειδίου του άνθρακα σε συνάρτηση του χρόνου (Διαγράμματα 18 και 19 αντίστοιχα), οι τιμές COV της οροφής αλλά και το CO της όδευσης διαφυγής αυξάνονται με το πέρασμα του χρόνου. Αντίστοιχα αποτελέσματα λαμβάνονται και από τα διαγράμματα θερμοκρασίας σε συνάρτηση χρόνου (Διαγράμματα 20 και 21 αντίστοιχα). Ποιο συγκεκριμένα στα παραπάνω διαγράμματα παρατηρείται η αύξηση των μελετώμενων τιμών με το πέρασμα του χρόνου. Ενώ στα διαγράμματα της ορατότητας σε συνάρτηση με το χρόνο παρατηρείται η μείωση της ορατότητας με το πέρασμα του χρόνου (Διαγράμματα 22 και 23 αντίστοιχα).

Διάγραμμα $COV(ppm)300m-t(s)$

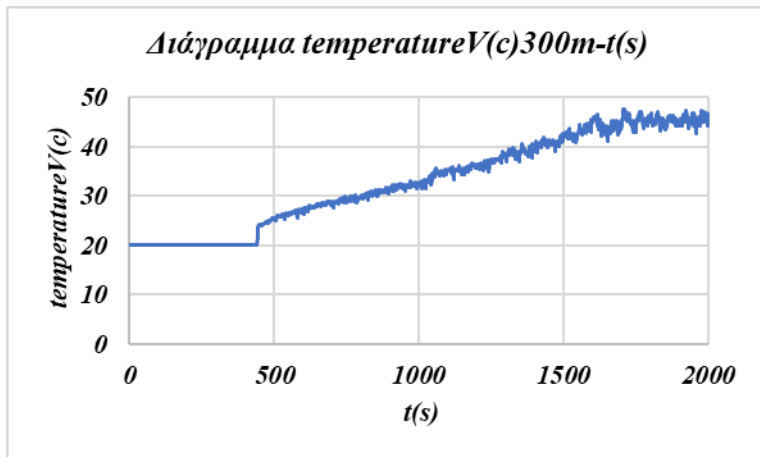


Διάγραμμα 54: Διάγραμμα μονοξειδίου του άνθρακα σε συνάρτηση με το χρόνο, στην οροφή της σήραγγας (απόσταση 300 m).

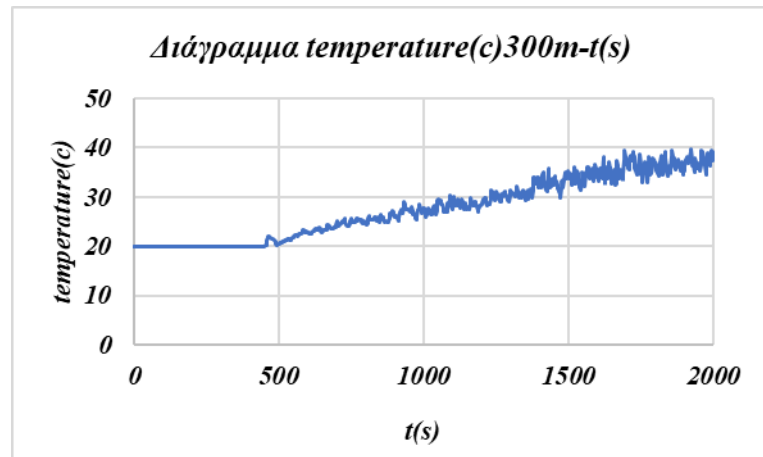
Διάγραμμα $CO(ppm)300m-t(s)$



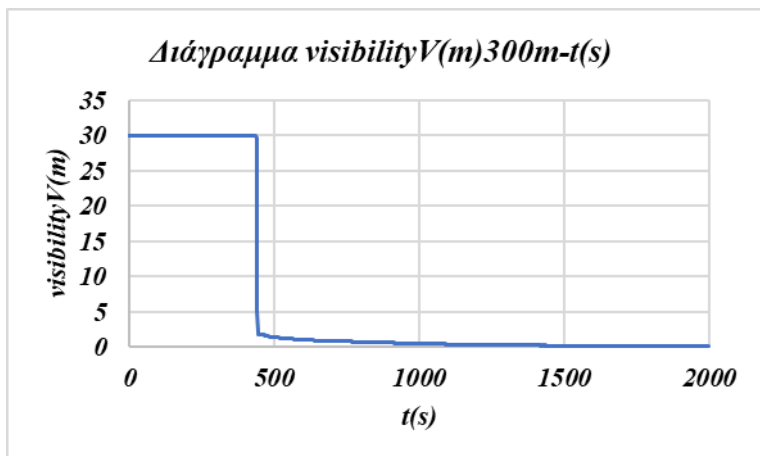
Διάγραμμα 55: Διάγραμμα μονοξειδίου του άνθρακα σε συνάρτηση με το χρόνο, στην όδευση διαφυγής της σήραγγας (απόσταση 300 m).



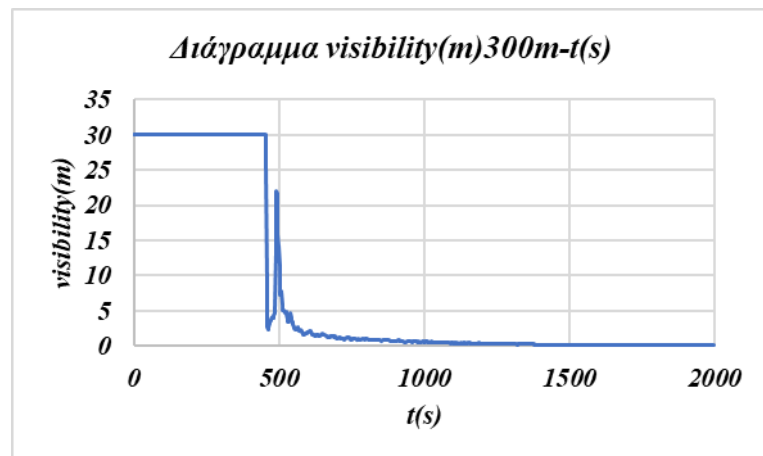
Διάγραμμα 56: Διάγραμμα θερμοκρασίας σε συνάρτηση με το χρόνο, στην οροφή της σήραγγας (απόσταση 300 m).



Διάγραμμα 57: Διάγραμμα θερμοκρασίας σε συνάρτηση με το χρόνο, στην όδευση διαφυγής της σήραγγας (απόσταση 300 m).



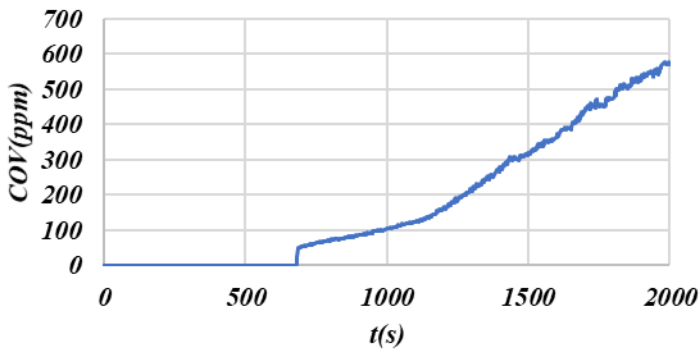
Διάγραμμα 58: Διάγραμμα ορατότητας σε συνάρτηση με το χρόνο, στην οροφή της σήραγγας (απόσταση 300 m).



Διάγραμμα 59: Διάγραμμα ορατότητας σε συνάρτηση με το χρόνο, στην όδευση διαφυγής της σήραγγας (απόσταση 300 m).

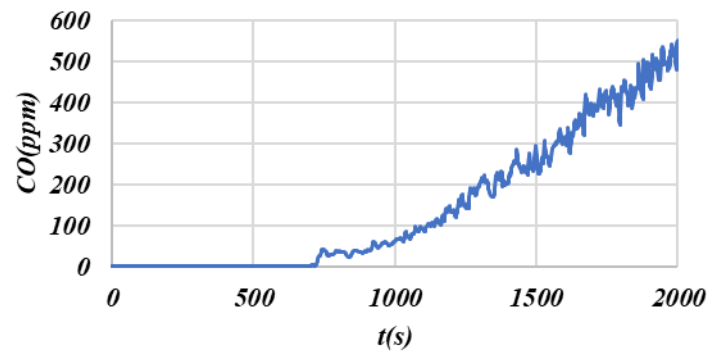
- Σε απόσταση 420 m από την φωτιά παρατηρούνται ότι στα διαγράμματα μονοξειδίου του άνθρακα σε συνάρτηση του χρόνου (Διαγράμματα 24 και 25 αντίστοιχα), οι τιμές COV της οροφής αλλά και το CO της όδευσης διαφυγής αυξάνονται με το πέρασμα του χρόνου. Αντίστοιχα αποτελέσματα λαμβάνονται και από τα διαγράμματα θερμοκρασίας σε συνάρτηση χρόνου (Διαγράμματα 26 και 27 αντίστοιχα). Ποιο συγκεκριμένα στα παραπάνω διαγράμματα παρατηρείται η αύξηση των μελετώμενων τιμών με το πέρασμα του χρόνου. Ενώ στα διαγράμματα της ορατότητας σε συνάρτηση με το χρόνο παρατηρείται η μείωση της ορατότητας με το πέρασμα του χρόνου (Διαγράμματα 28 και 29 αντίστοιχα).

Διάγραμμα COV(ppm)420m-t(s)



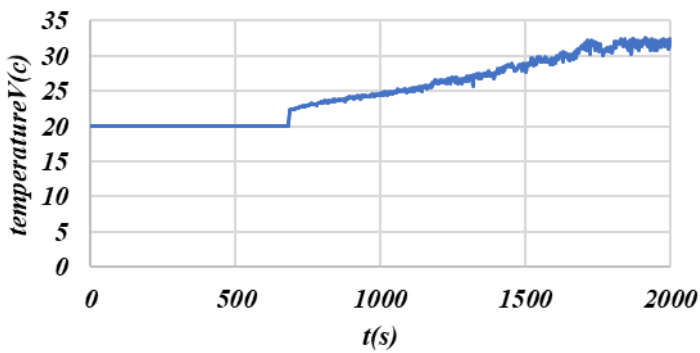
Διάγραμμα 60: Διάγραμμα μονοξείδιο του άνθρακα σε συνάρτηση με το χρόνο, στην οροφή της σήραγγας (απόσταση 420 m).

Διάγραμμα CO(ppm)420m-t(s)



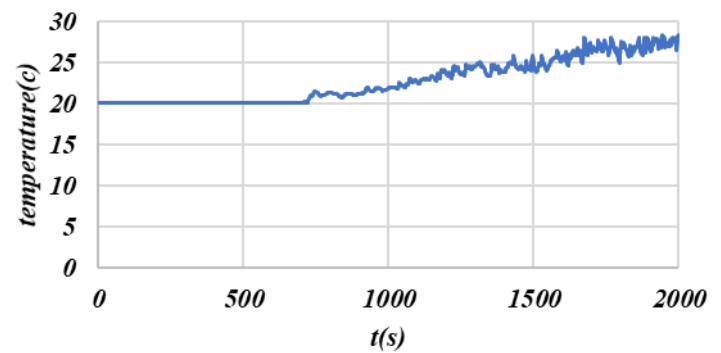
Διάγραμμα 61: Διάγραμμα μονοξείδιο του άνθρακα σε συνάρτηση με το χρόνο, στην όδευση διαφυγής της σήραγγας (απόσταση 420 m).

Διάγραμμα temperatureV(c)420m-t(s)

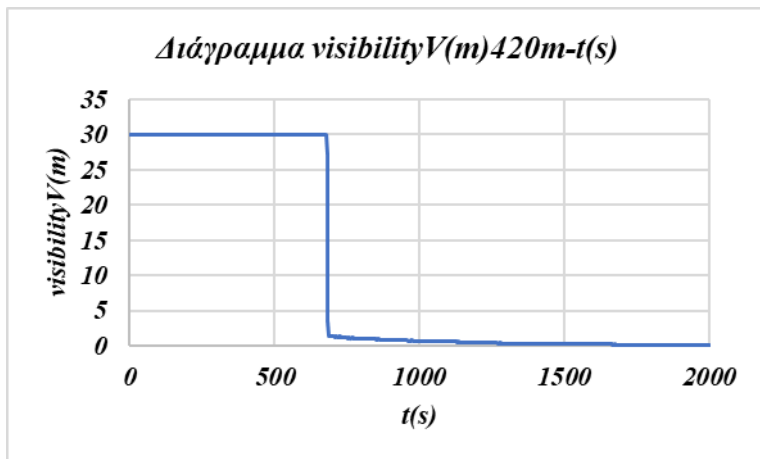


Διάγραμμα 62: Διάγραμμα θερμοκρασίας σε συνάρτηση με το χρόνο, στην οροφή της σήραγγας (απόσταση 420 m).

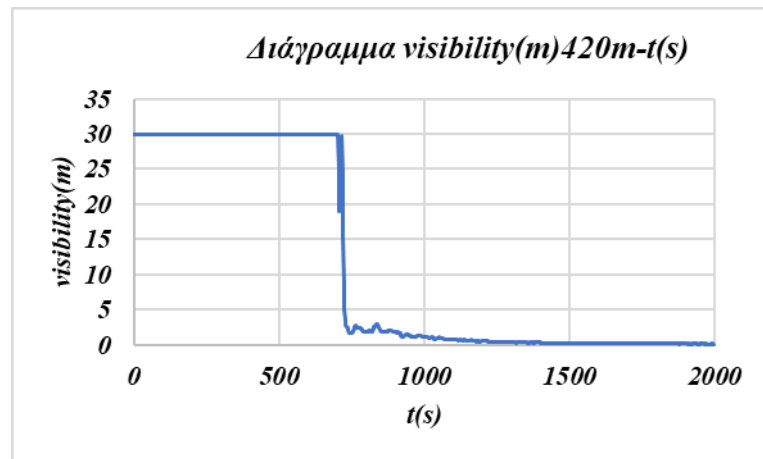
Διάγραμμα temperature(c)420m-t(s)



Διάγραμμα 63: Διάγραμμα θερμοκρασίας σε συνάρτηση με το χρόνο, στην όδευση διαφυγής της σήραγγας (απόσταση 420 m).

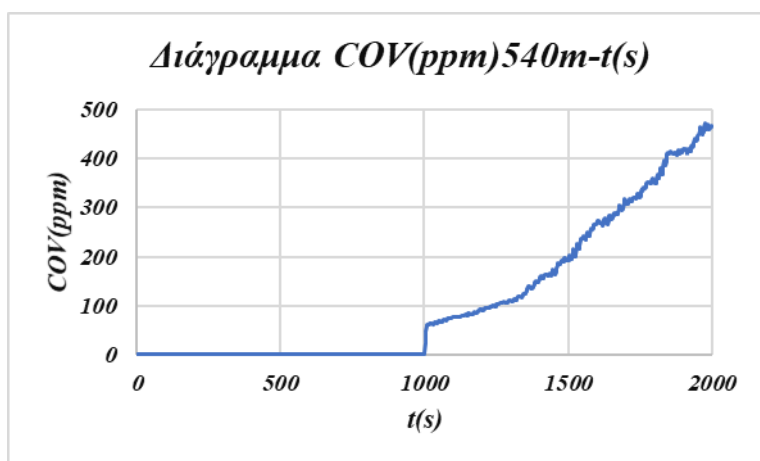


Διάγραμμα 64: Διάγραμμα ορατότητας σε συνάρτηση με το χρόνο, στην οροφή της σήραγγας (απόσταση 420 m).

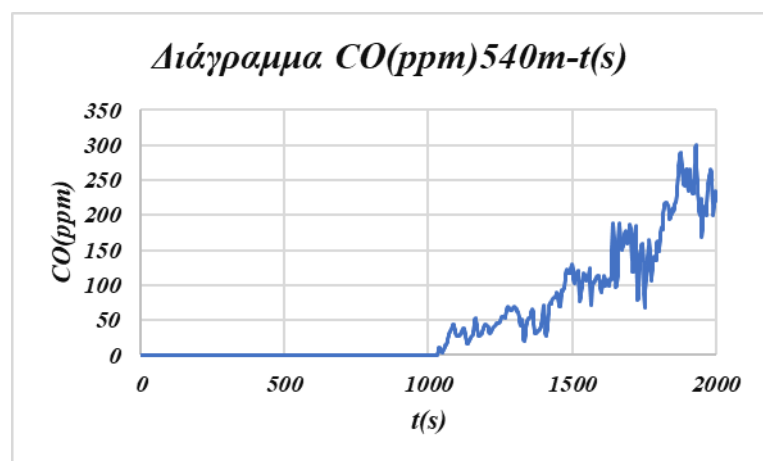


Διάγραμμα 65: Διάγραμμα ορατότητας σε συνάρτηση με το χρόνο, στην όδευση διαφυγής της σήραγγας (απόσταση 420 m).

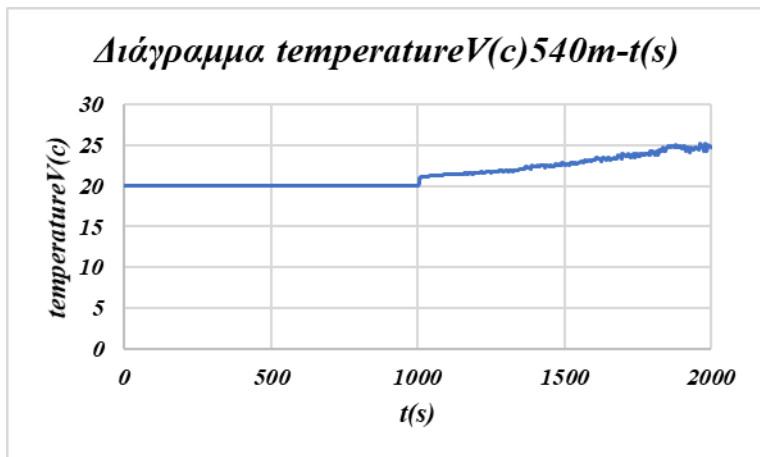
- Σε απόσταση 540 m από την φωτιά παρατηρούνται ότι στα διαγράμματα μονοξειδίου του άνθρακα σε συνάρτηση του χρόνου (Διαγράμματα 30 και 31 αντίστοιχα), οι τιμές COV της οροφής αλλά και το CO της όδευσης διαφυγής αυξάνονται με το πέρασμα του χρόνου. Αντίστοιχα αποτελέσματα λαμβάνονται και από τα διαγράμματα θερμοκρασίας σε συνάρτηση χρόνου (Διαγράμματα 32 και 33 αντίστοιχα). Ποιο συγκεκριμένα στα παραπάνω διαγράμματα παρατηρείται η αύξηση των μελετώμενων τιμών με το πέρασμα του χρόνου. Ενώ στα διαγράμματα της ορατότητας σε συνάρτηση με το χρόνο παρατηρείται η μείωση της ορατότητας με το πέρασμα του χρόνου (Διαγράμματα 34 και 35 αντίστοιχα).



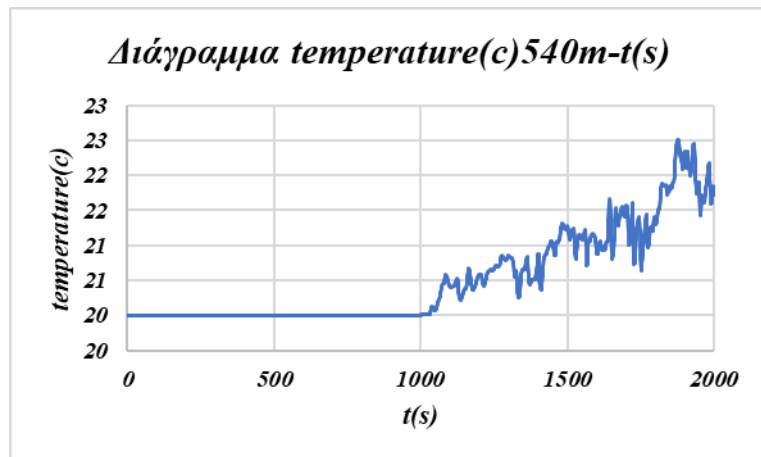
Διάγραμμα 66: Διάγραμμα μονοξειδίου του άνθρακα σε συνάρτηση με το χρόνο, στην οροφή της σήραγγας (απόσταση 540 m).



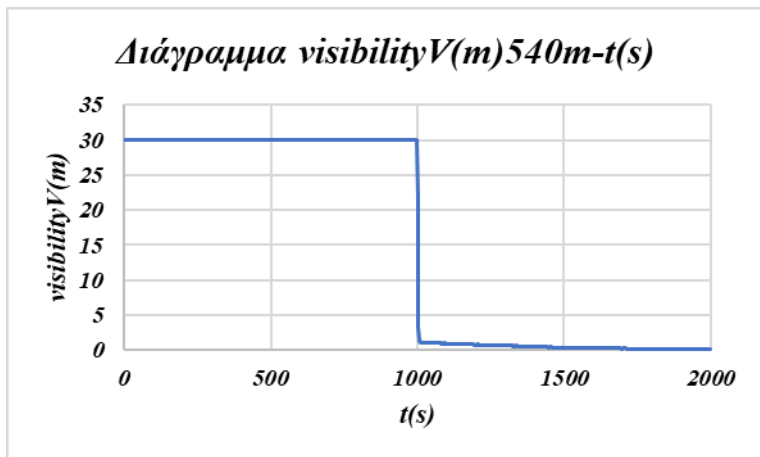
Διάγραμμα 67: Διάγραμμα μονοξειδίου του άνθρακα σε συνάρτηση με το χρόνο, στην όδευση διαφυγής της σήραγγας (απόσταση 540 m).



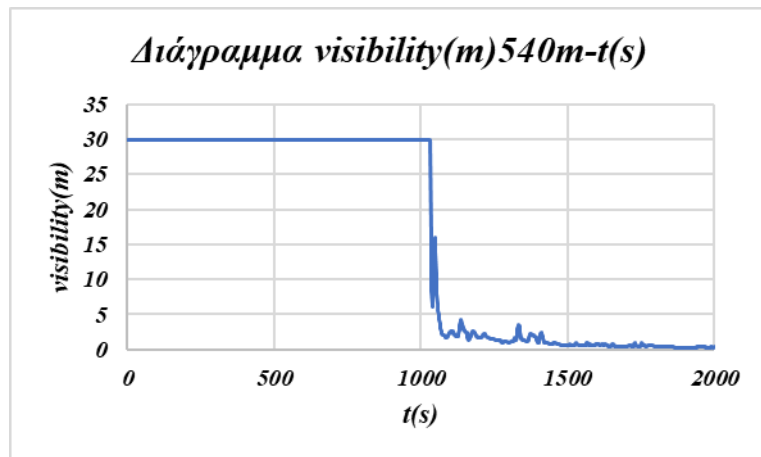
Διάγραμμα 68: Διάγραμμα θερμοκρασίας σε συνάρτηση με το χρόνο, στην οροφή της σήραγγας (απόσταση 540 m).



Διάγραμμα 69: Διάγραμμα θερμοκρασίας σε συνάρτηση με το χρόνο, στην όδευση διαφυγής της σήραγγας (απόσταση 540 m).



Διάγραμμα 70: Διάγραμμα ορατότητας σε συνάρτηση με το χρόνο, στην οροφή της σήραγγας (απόσταση 540 m).



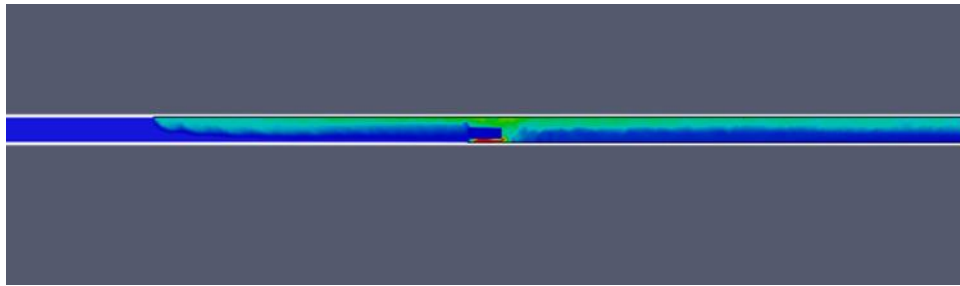
Διάγραμμα 71: Διάγραμμα ορατότητας σε συνάρτηση με το χρόνο, στην όδευση διαφυγής της σήραγγας (απόσταση 540 m).

4.2.2 Σενάριο 2

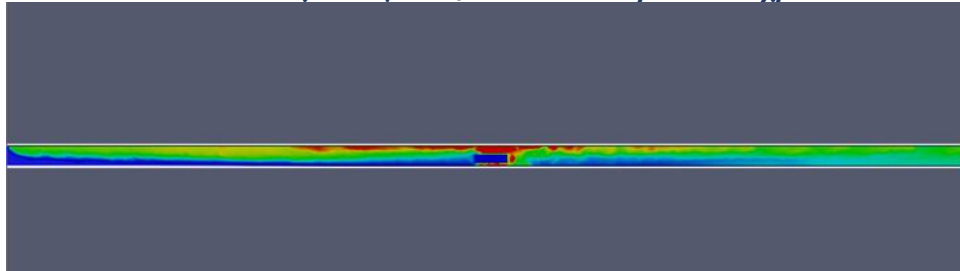
Στο δεύτερο σενάριο η ταχύτητα του αέρα είναι 1 m/s.

Τα SLICES που χρησιμοποιήθηκαν είναι για τη μέτρηση του μονοξειδίου του άνθρακα, της ορατότητας και της θερμοκρασίας.

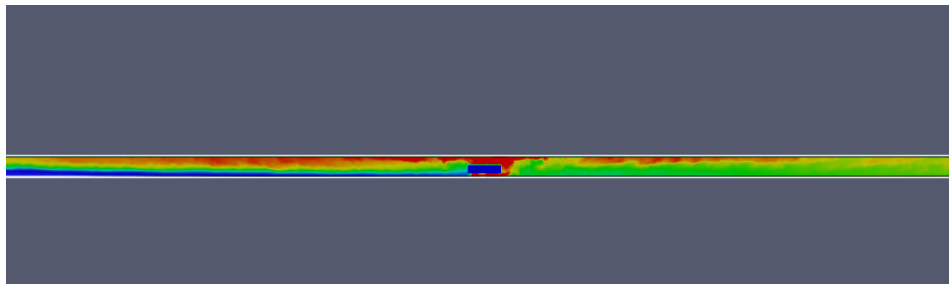
Στην (Εικόνα 18) παρουσιάζονται τα SLICES για το μονοξείδιο του άνθρακα. Παρατηρείται ότι από 900 sec οι τιμές του μονοξειδίου του άνθρακα αυξάνονται στην οροφή της σήραγγας και στη συνέχεια με το πέρασμα του χρόνου στα 1300 sec εξαπλώνονται σταδιακά και στην όδευση διαφυγής (Εικόνα 19). Όπως και στα 1600 sec με το πέρασμα του χρόνου οι τιμές του μονοξειδίου του άνθρακα είναι πολύ υψηλές στην οροφή και στην όδευση διαφυγής (Εικόνα 20).



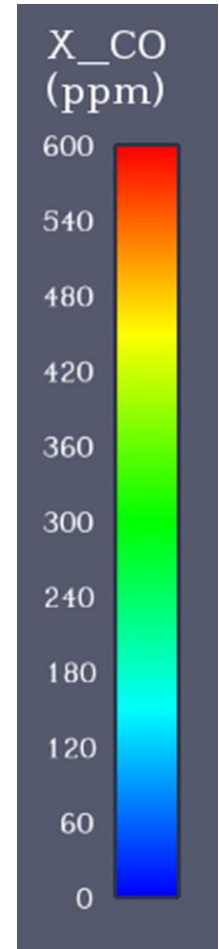
Εικόνα 19: SLICES για το μονοξείδιο του άνθρακα σε χρόνο 900 sec



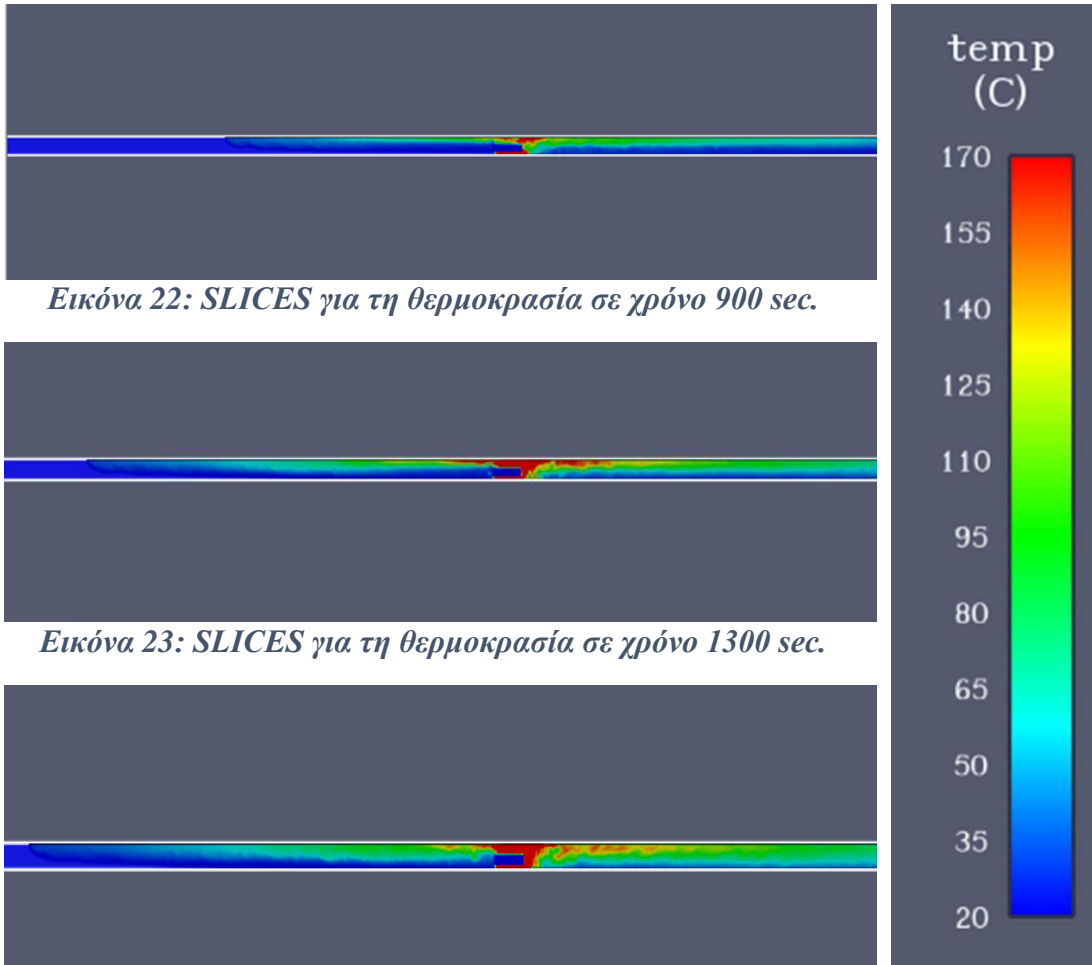
Εικόνα 20: SLICES για το μονοξείδιο του άνθρακα σε χρόνο 1300 sec.



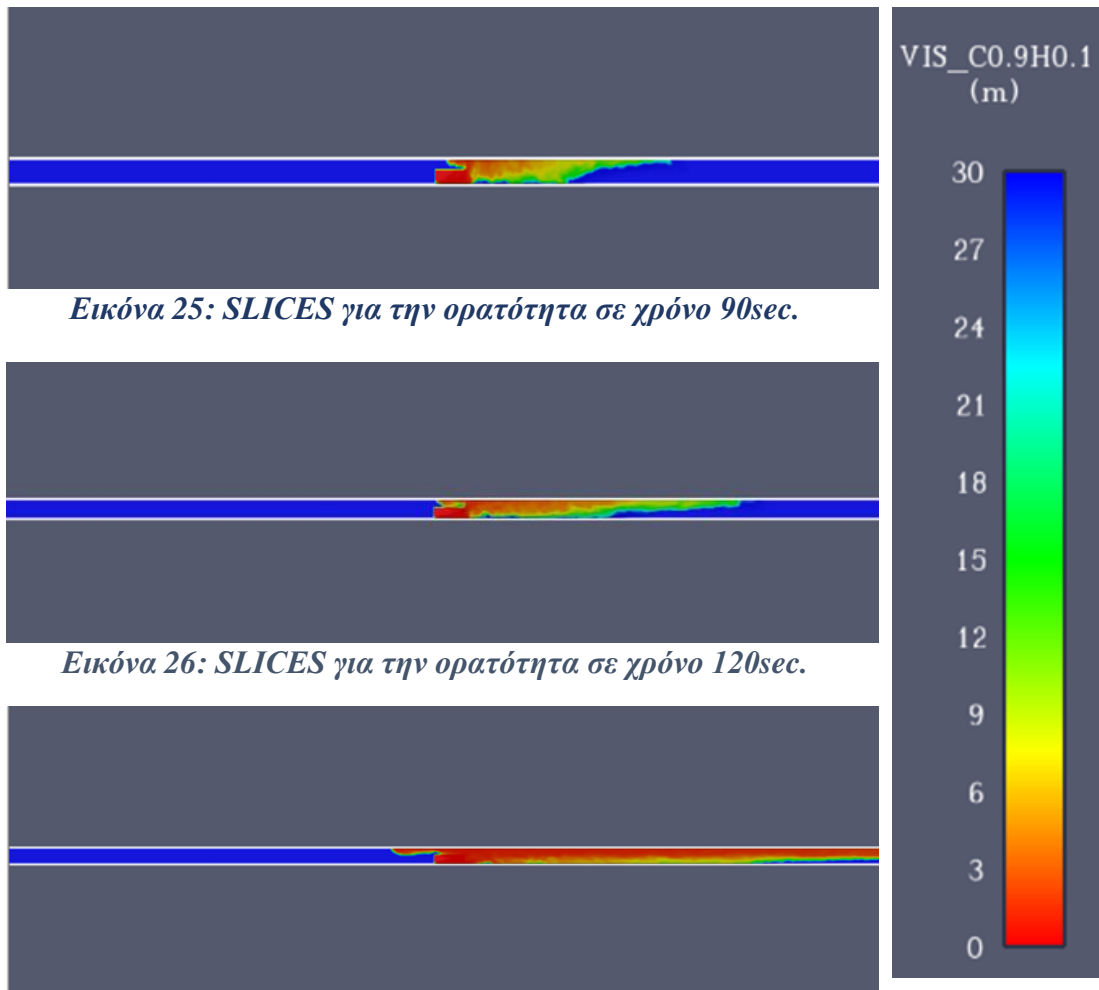
Εικόνα 21: SLICES για το μονοξείδιο του άνθρακα σε χρόνο 1600 sec



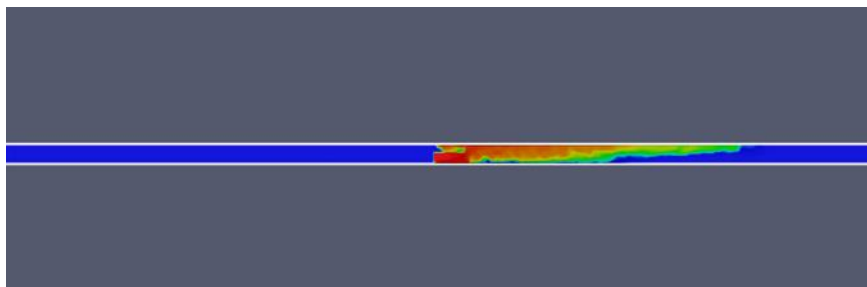
Τα SLICES για την θερμοκρασία παρουσιάζονται στην (Εικόνα 21). Παρατηρείται ότι από 900 sec οι τιμές της θερμοκρασίας αυξάνονται στην οροφή της σήραγγας και στη συνέχεια με το πέρασμα του χρόνου στα 1300 sec εξαπλώνονται σταδιακά και στην όδευση διαφυγής (Εικόνα 22). Ενώ στα 1600 sec με το πέρασμα του χρόνου οι τιμές της θερμοκρασίας είναι πολύ υψηλές στην οροφή και στην όδευση διαφυγής (Εικόνα 23).



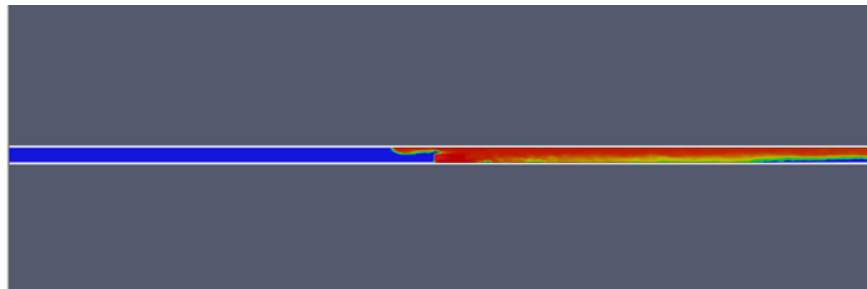
Στην (Εικόνα 24) παρουσιάζονται τα SLICES για την ορατότητα. Παρατηρείται ότι από 90 sec οι τιμές της ορατότητας αυξάνονται στην οροφή της σήραγγας και στη συνέχεια με το πέρασμα του χρόνου στα 120 sec εξαπλώνονται σταδιακά και στην όδευση διαφυγής (Εικόνα 25). Ενώ στα 280 sec με το πέρασμα του χρόνου οι τιμές της ορατότητας είναι πολύ υψηλές στην οροφή και στην όδευση διαφυγής (Εικόνα 26).



Εικόνα 25: SLICES για την ορατότητα σε χρόνο 90sec.



Εικόνα 26: SLICES για την ορατότητα σε χρόνο 120sec.

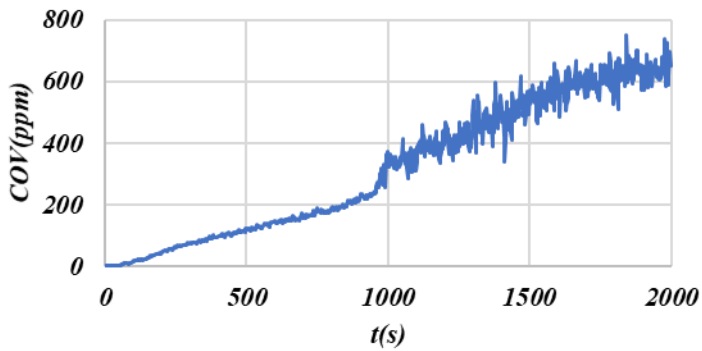


Εικόνα 27: SLICES για την ορατότητα σε χρόνο 280sec.

Από τα DEVICES που τοποθετήθηκαν σε διάφορα κρίσιμα σημεία της σήραγγας όπως στην οροφή της σήραγγας και στην όδευση διαφυγής παρουσιάζονται παρακάτω.

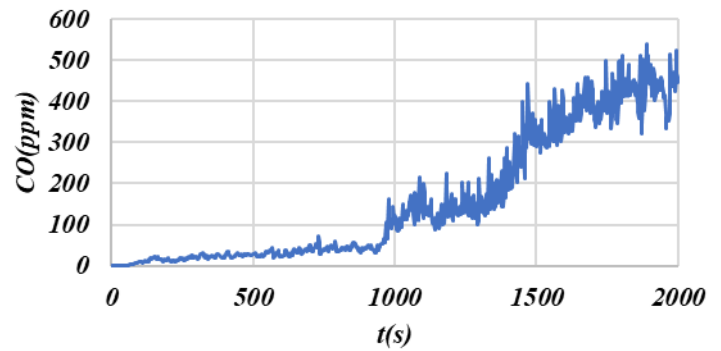
- Σε απόσταση 60 m από την φωτιά παρατηρούνται ότι στα διάγραμμα μονοξειδίου του άνθρακα σε συνάρτηση του χρόνου (Διαγράμματα 36 και 37 αντίστοιχα), οι τιμές COV της οροφής αλλά και το CO της όδευσης διαφυγής αυξάνονται με το πέρασμα του χρόνου. Αντίστοιχα αποτελέσματα λαμβάνονται και από τα διαγράμματα θερμοκρασίας σε συνάρτηση χρόνου (Διαγράμματα 38 και 39 αντίστοιχα). Ποιο συγκεκριμένα στα παραπάνω διαγράμματα παρατηρείται η αύξηση των μελετώμενων τιμών με το πέρασμα του χρόνου. Ενώ στα διαγράμματα της ορατότητας σε συνάρτηση με το χρόνο παρατηρείται η μείωση της ορατότητας με το πέρασμα του χρόνου (Διαγράμματα 40 και 41 αντίστοιχα).

Διάγραμμα COV(ppm)60m-t(s)



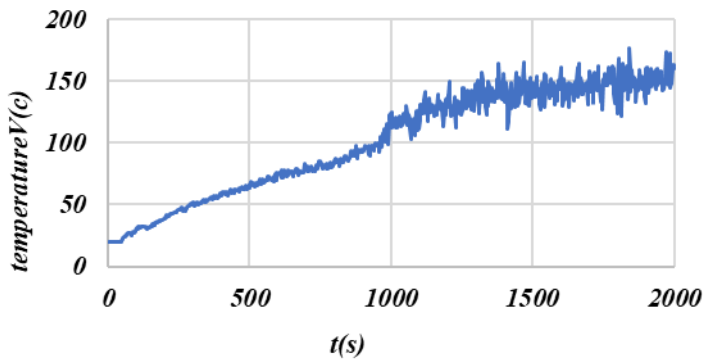
Διάγραμμα 72: Διάγραμμα μονοξείδιο του άνθρακα σε συνάρτηση με το χρόνο, στην οροφή της σήραγγας (απόσταση 60m).

Διαγράμματα CO(ppm)60m-t(s)



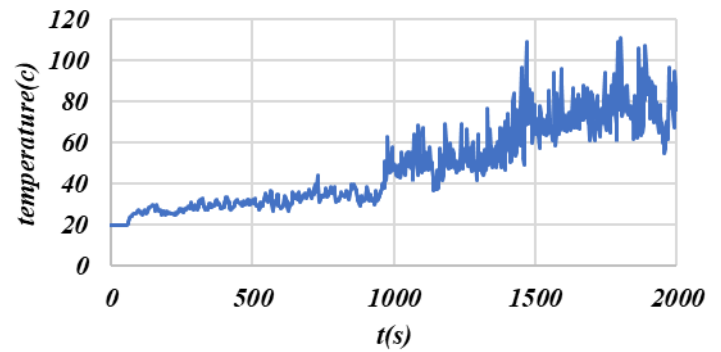
Διάγραμμα 73: Διάγραμμα μονοξείδιο του άνθρακα σε συνάρτηση με το χρόνο, στην όδευση διαφυγής της σήραγγας (απόσταση 60m).

Διάγραμμα temperatureV(c)60m-t(s)



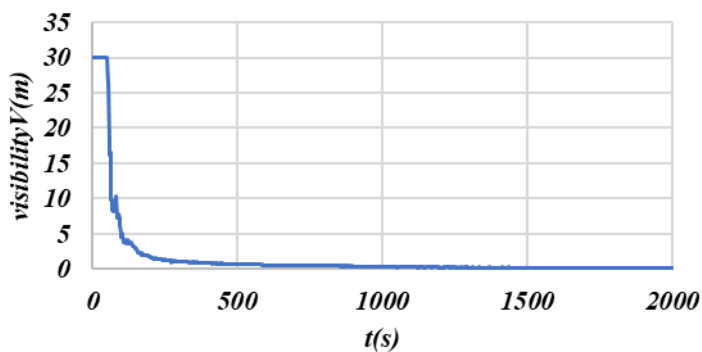
Διάγραμμα 74: Διάγραμμα θερμοκρασίας σε συνάρτηση με το χρόνο, στην οροφή της σήραγγας (απόσταση 60m).

Διάγραμμα temperature(c)60m-t(s)



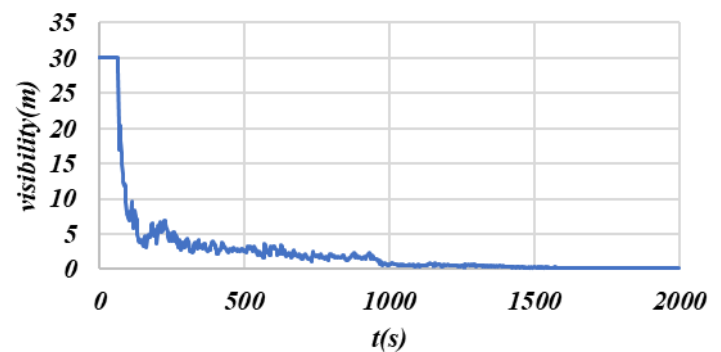
Διάγραμμα 75: Διάγραμμα θερμοκρασίας σε συνάρτηση με το χρόνο, στην όδευση διαφυγής της σήραγγας (απόσταση 60m).

Διάγραμμα visibilityV(m)60m-t(s)



Διάγραμμα 76: Διάγραμμα ορατότητας σε συνάρτηση με το χρόνο, στην οροφή της σήραγγας (απόσταση 60m).

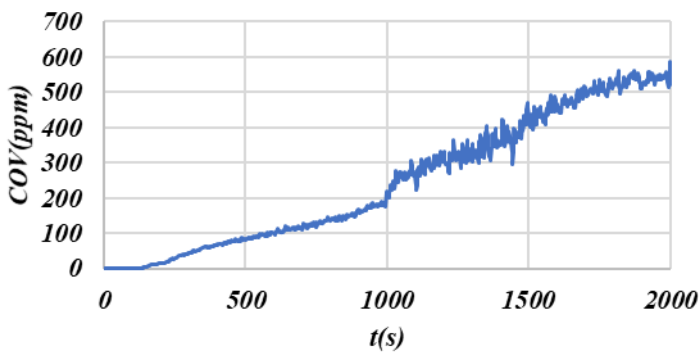
Διάγραμμα visibility(m)60m-t(s)



Διάγραμμα 77: Διάγραμμα ορατότητας σε συνάρτηση με το χρόνο, στην όδευση διαφυγής της σήραγγας (απόσταση 60m).

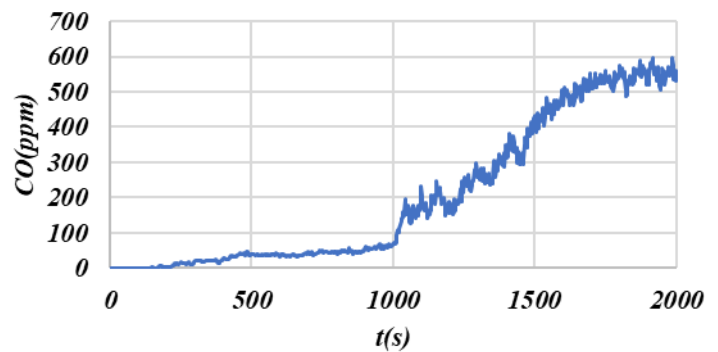
- Σε απόσταση 180 m από την φωτιά παρατηρούνται ότι στα διαγράμματα μονοξειδίου του άνθρακα σε συνάρτησι του χρόνου (Διαγράμματα 42 και 43 αντίστοιχα), οι τιμές COV της οροφής αλλά και το CO της όδευσης διαφυγής αυξάνονται με το πέρασμα του χρόνου. Αντίστοιχα αποτελέσματα λαμβάνονται και από τα διαγράμματα θερμοκρασίας σε συνάρτηση χρόνου (Διαγράμματα 44 και 45 αντίστοιχα). Ποιο συγκεκριμένα στα παραπάνω διαγράμματα παρατηρείται η αύξηση των μελετώμενων τιμών με το πέρασμα του χρόνου. Ενώ στα διαγράμματα της ορατότητας σε συνάρτηση με το χρόνο παρατηρείται η μείωση της ορατότητας με το πέρασμα του χρόνου (Διαγράμματα 46 και 47 αντίστοιχα).

Διάγραμμα COV(ppm)180m-t(s)



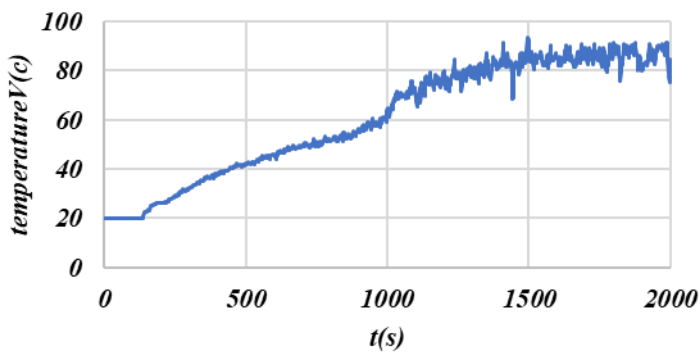
Διάγραμμα 78: Διάγραμμα μονοξειδίου του άνθρακα σε συνάρτηση με το χρόνο, στην οροφή της σήραγγας (απόσταση 180m).

Διάγραμμα CO(ppm)180m-t(s)



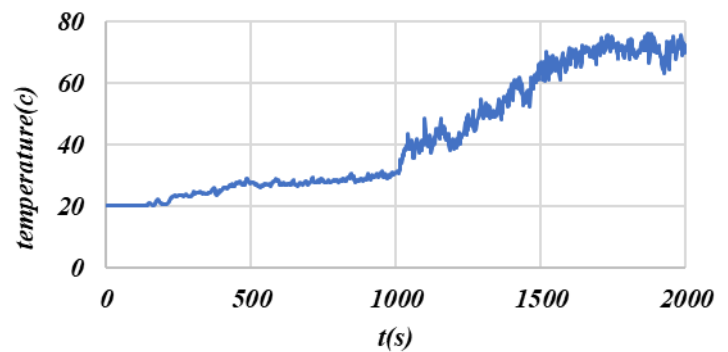
Διάγραμμα 79: Διάγραμμα μονοξειδίου του άνθρακα σε συνάρτηση με το χρόνο, στην όδευση διαφυγής της σήραγγας (απόσταση 180m).

Διάγραμμα temperatureV(c)180m-t(s)



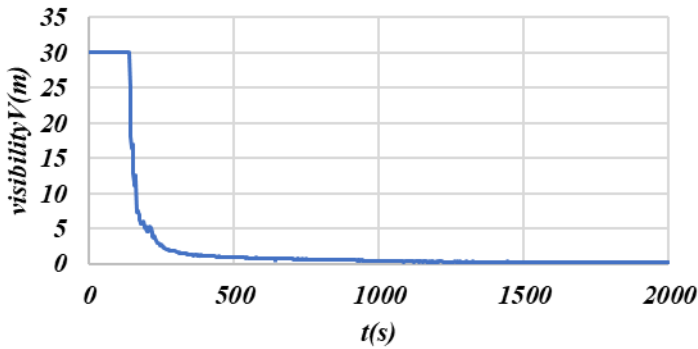
Διάγραμμα 80: Διάγραμμα θερμοκρασίας σε συνάρτηση με το χρόνο, στην οροφή της σήραγγας (απόσταση 180m).

Διάγραμμα temperature(c)180m-t(s)



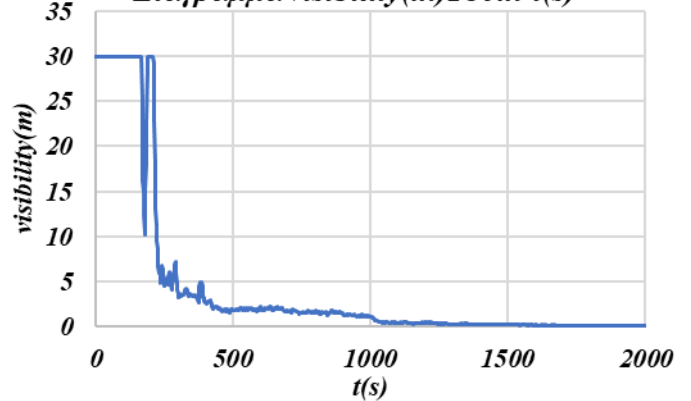
Διάγραμμα 81: Διάγραμμα θερμοκρασίας σε συνάρτηση με το χρόνο, στην όδευση διαφυγής της σήραγγας (απόσταση 180m).

Διάγραμμα visibility V(m)180m-t(s)



Διάγραμμα 82: Διάγραμμα ορατότητας σε συνάρτηση με το χρόνο, στην οροφή της σήραγγας (απόσταση 180m).

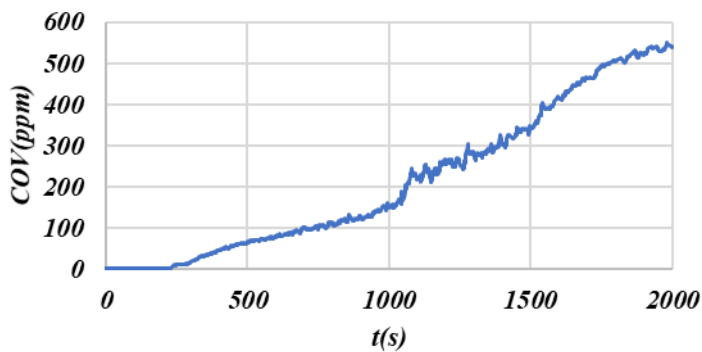
Διάγραμμα visibility(m)180m-t(s)



Διάγραμμα 83: Διάγραμμα ορατότητας σε συνάρτηση με το χρόνο, στην όδευση διαφυγής της σήραγγας (απόσταση 180m).

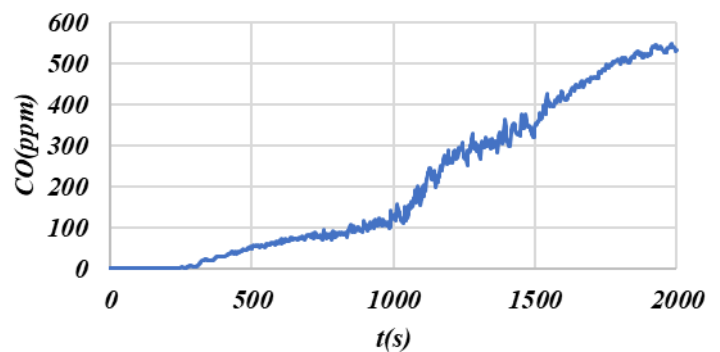
- Σε απόσταση 300 m από την φωτιά παρατηρούνται ότι στα διαγράμματα μονοξειδίου του άνθρακα σε συνάρτηση του χρόνου (Διαγράμματα 48 και 49 αντίστοιχα), οι τιμές COV της οροφής αλλά και το CO της όδευσης διαφυγής αυξάνονται με το πέρασμα του χρόνου. Αντίστοιχα αποτελέσματα λαμβάνονται και από τα διαγράμματα θερμοκρασίας σε συνάρτηση χρόνου (Διαγράμματα 50 και 51 αντίστοιχα). Ποιο συγκεκριμένα στα παραπάνω διαγράμματα παρατηρείται η αύξηση των μελετώμενων τιμών με το πέρασμα του χρόνου. Ενώ στα διαγράμματα της ορατότητας σε συνάρτηση με το χρόνο παρατηρείται η μείωση της ορατότητας με το πέρασμα του χρόνου (Διαγράμματα 52 και 53 αντίστοιχα).

Διάγραμμα COV(ppm)300m-t(s)

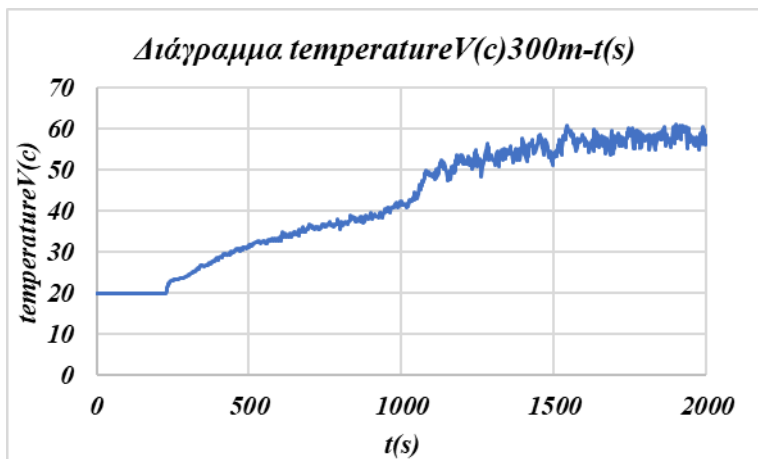


Διάγραμμα 84: Διάγραμμα μονοξειδίου του άνθρακα σε συνάρτηση με το χρόνο, στην οροφή της σήραγγας (απόσταση 300m).

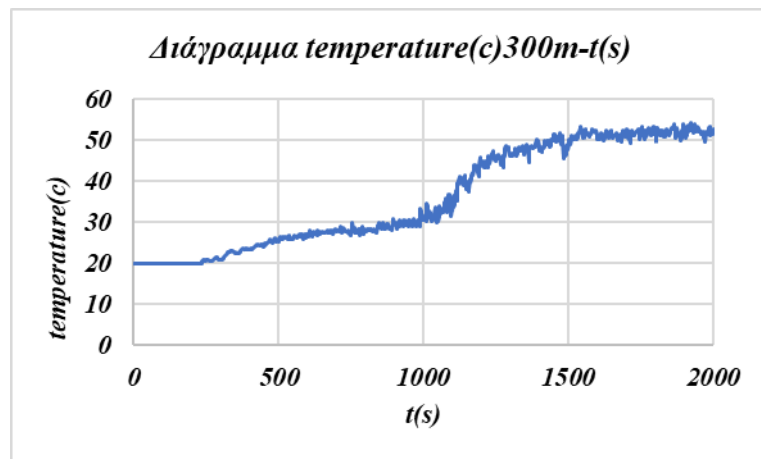
Διάγραμμα CO(ppm)300m-t(s)



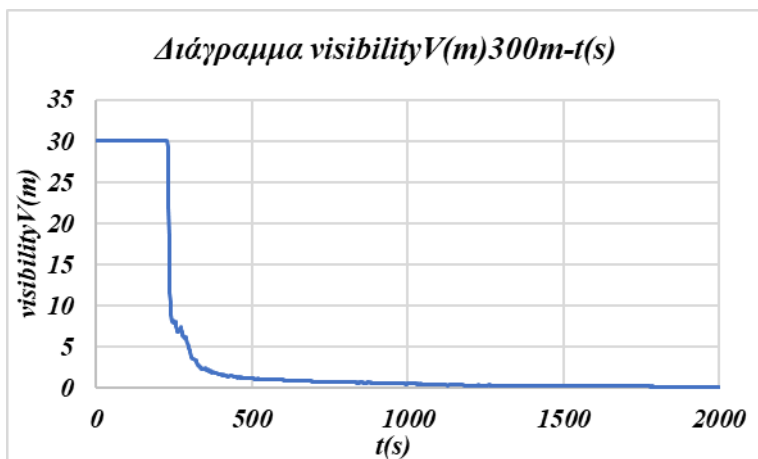
Διάγραμμα 85: Διάγραμμα μονοξειδίου του άνθρακα σε συνάρτηση με το χρόνο, στην όδευση διαφυγής της σήραγγας (απόσταση 300m).



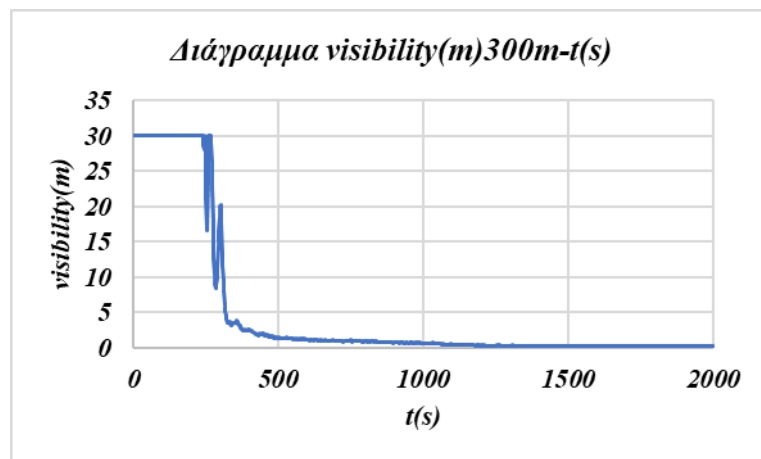
Διάγραμμα 86: Διάγραμμα θερμοκρασίας σε συνάρτηση με το χρόνο, στην οροφή της σήραγγας (απόσταση 300m).



Διάγραμμα 87: Διάγραμμα θερμοκρασίας σε συνάρτηση με το χρόνο, στην όδευση διαφυγής της σήραγγας (απόσταση 300m).



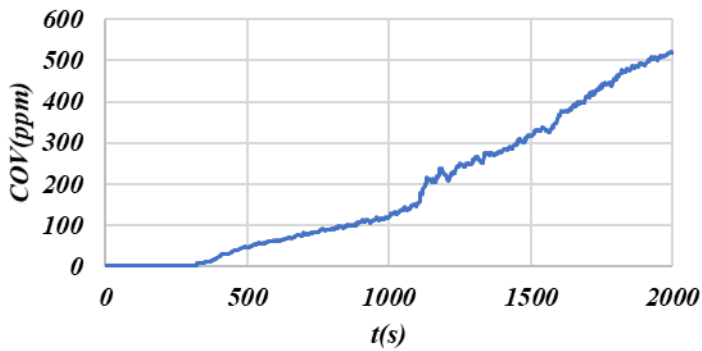
Διάγραμμα 88: Διάγραμμα ορατότητας σε συνάρτηση με το χρόνο, στην οροφή της σήραγγας (απόσταση 300m).



Διάγραμμα 89: Διάγραμμα ορατότητας σε συνάρτηση με το χρόνο, στην όδευση διαφυγής της σήραγγας (απόσταση 300m).

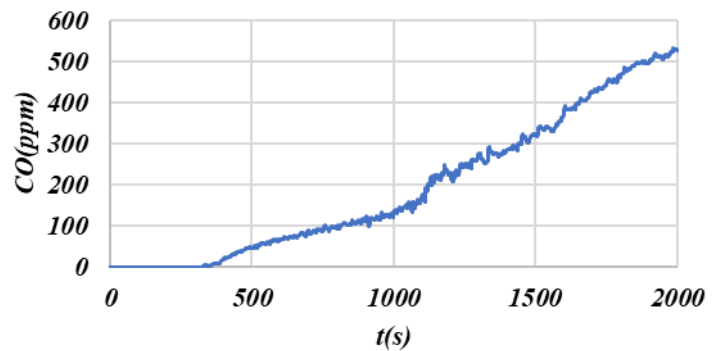
- Σε απόσταση 420 m από την φωτιά παρατηρούνται ότι στα διαγράμματα μονοξειδίου του άνθρακα σε συνάρτηση του χρόνου (Διαγράμματα 54 και 55 αντίστοιχα), οι τιμές COV της οροφής αλλά και το CO της όδευσης διαφυγής αυξάνονται με το πέρασμα του χρόνου. Αντίστοιχα αποτελέσματα λαμβάνονται και από τα διαγράμματα θερμοκρασίας σε συνάρτηση χρόνου (Διαγράμματα 56 και 57 αντίστοιχα). Ποιο συγκεκριμένα στα παραπάνω διαγράμματα παρατηρείται η αύξηση των μελετώμενων τιμών με το πέρασμα του χρόνου. Ενώ στα διαγράμματα της ορατότητας σε συνάρτηση με το χρόνο παρατηρείται η μείωση της ορατότητας με το πέρασμα του χρόνου (Διαγράμματα 58 και 59 αντίστοιχα).

Διάγραμμα COV(ppm)420m-t(s)



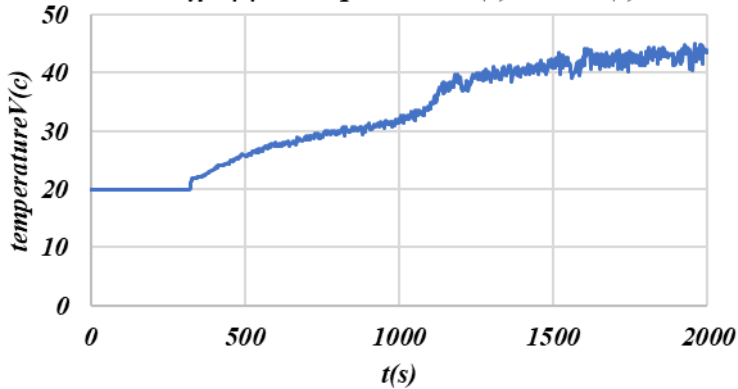
Διάγραμμα 90: Διάγραμμα μονοξείδιο του άνθρακα σε συνάρτηση με το χρόνο, στην οροφή της σήραγγας (απόσταση 420m).

Διάγραμμα CO(ppm)420m-t(s)



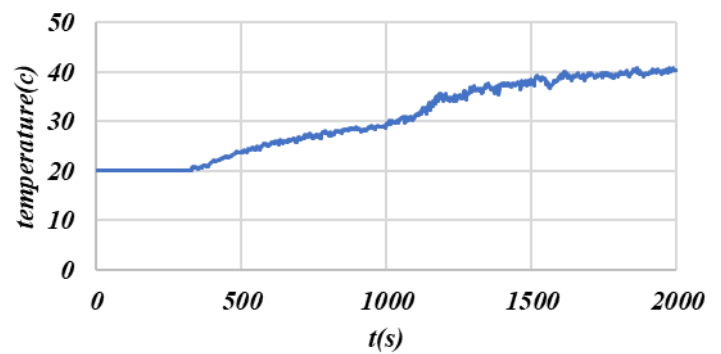
Διάγραμμα 91: Διάγραμμα μονοξείδιο του άνθρακα σε συνάρτηση με το χρόνο, στην όδευση διαφυγής της σήραγγας (απόσταση 420m).

Διάγραμμα temperatureV(c)420m-t(s)



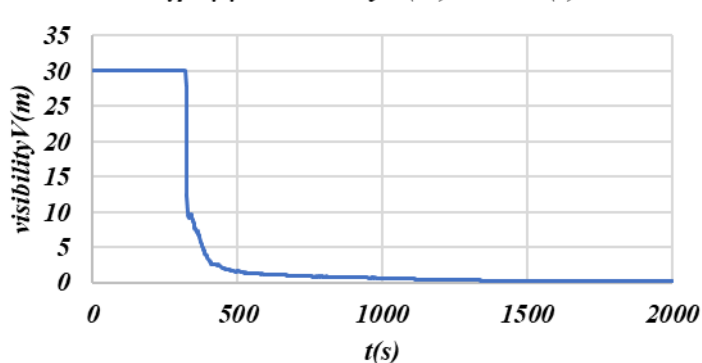
Διάγραμμα 92: Διάγραμμα θερμοκρασίας σε συνάρτηση με το χρόνο, στην οροφή της σήραγγας (απόσταση 420m).

Διάγραμμα temperature(c)420m-t(s)



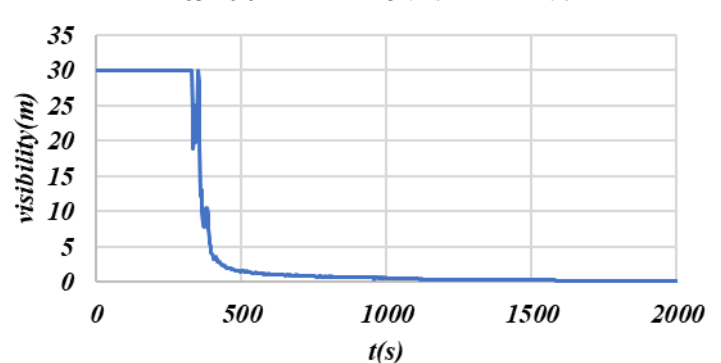
Διάγραμμα 93: Διάγραμμα θερμοκρασίας σε συνάρτηση με το χρόνο, στην όδευση διαφυγής της σήραγγας (απόσταση 420m).

Διάγραμμα visibilityV(m)420m-t(s)



Διάγραμμα 94: Διάγραμμα ορατότητας σε συνάρτηση με το χρόνο, στην οροφή της σήραγγας (απόσταση 420m).

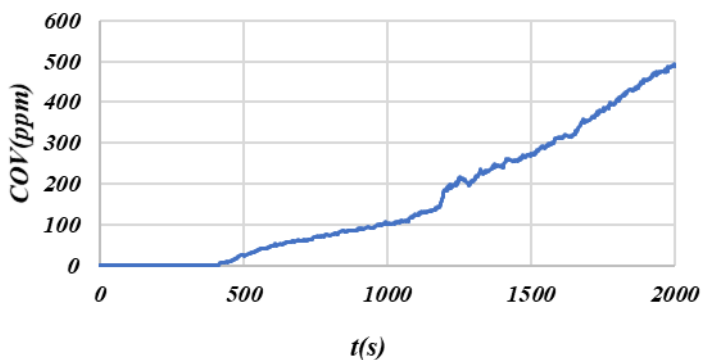
Διάγραμμα visibility(m)420m-t(s)



Διάγραμμα 95: Διάγραμμα ορατότητας σε συνάρτηση με το χρόνο, στην όδευση διαφυγής της σήραγγας (απόσταση 420m).

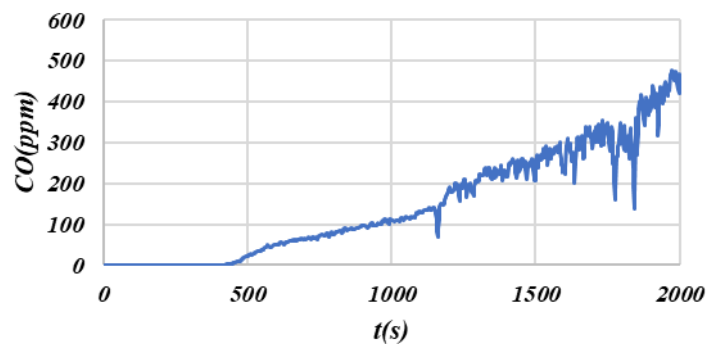
- Σε απόσταση 540 m από την φωτιά παρατηρούνται ότι στα διαγράμματα μονοξειδίου του άνθρακα σε συνάρτηση του χρόνου (Διαγράμματα 60 και 61 αντίστοιχα), οι τιμές COV της οροφής αλλά και το CO της όδευσης διαφυγής αυξάνονται με το πέρασμα του χρόνου. Αντίστοιχα αποτελέσματα λαμβάνονται και από τα διαγράμματα θερμοκρασίας σε συνάρτηση χρόνου (Διαγράμματα 62 και 63 αντίστοιχα). Ποιο συγκεκριμένα στα παραπάνω διαγράμματα παρατηρείται η αύξηση των μελετώμενων τιμών με το πέρασμα του χρόνου. Ενώ στα διαγράμματα της ορατότητας σε συνάρτηση με το χρόνο παρατηρείται η μείωση της ορατότητας με το πέρασμα του χρόνου (Διαγράμματα 64 και 65 αντίστοιχα).

Διάγραμμα COV(ppm)540m-t(s)



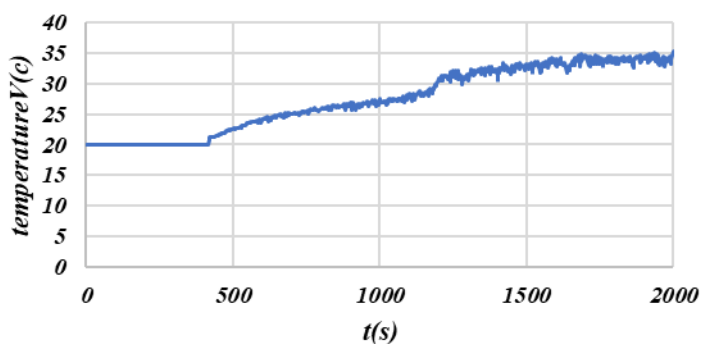
Διάγραμμα 96: Διάγραμμα μονοξειδίου του άνθρακα σε συνάρτηση με το χρόνο, στην οροφή της σήραγγας (απόσταση 540m).

Διάγραμμα CO(ppm)540m-t(s)



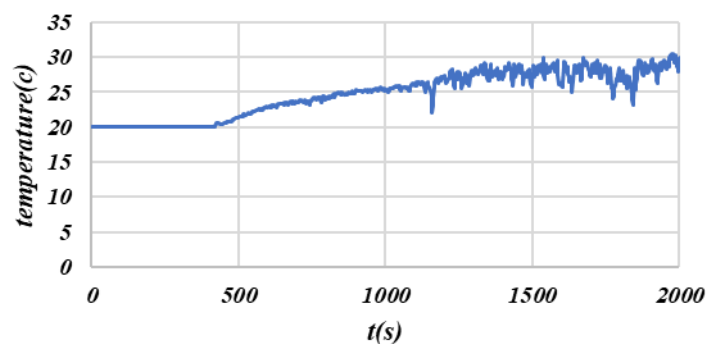
Διάγραμμα 97: Διάγραμμα μονοξειδίου του άνθρακα σε συνάρτηση με το χρόνο, στην όδευση διαφυγής της σήραγγας (απόσταση 540m).

Διάγραμμα temperatureV(c)540m-t(s)

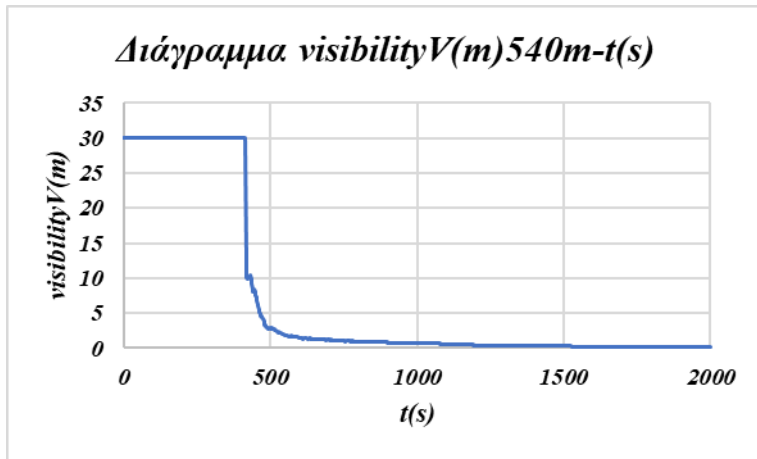


Διάγραμμα 98: Διάγραμμα θερμοκρασίας σε συνάρτηση με το χρόνο, στην οροφή της σήραγγας (απόσταση 540m).

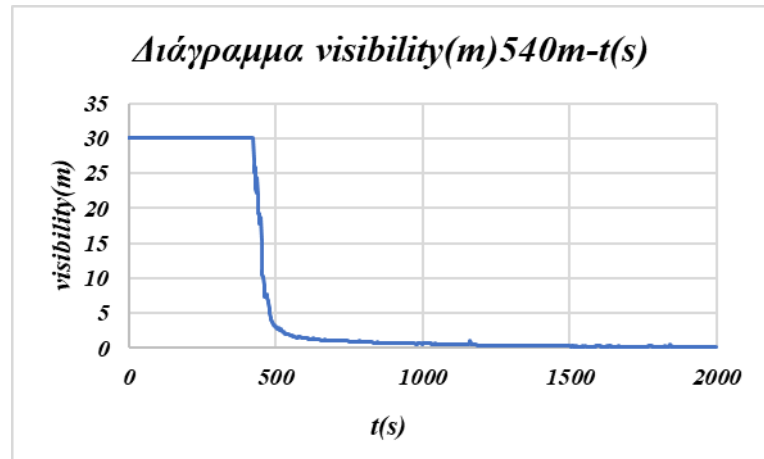
Διάγραμμα temperature(c)540m-t(s)



Διάγραμμα 99: Διάγραμμα θερμοκρασίας σε συνάρτηση με το χρόνο, στην όδευση διαφυγής της σήραγγας (απόσταση 540m).



Διάγραμμα 100: Διάγραμμα ορατότητας σε συνάρτηση με το χρόνο, στην οροφή της σήραγγας (απόσταση 540m).



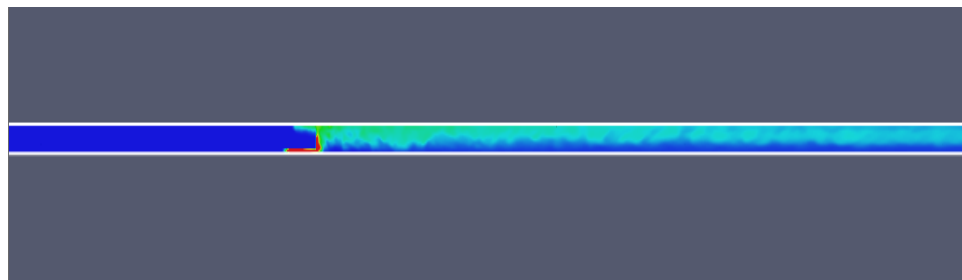
Διάγραμμα 101: Διάγραμμα ορατότητας σε συνάρτηση με το χρόνο, στην όδευση διαφυγής της σήραγγας (απόσταση 540m).

4.2.3 Σενάριο 3

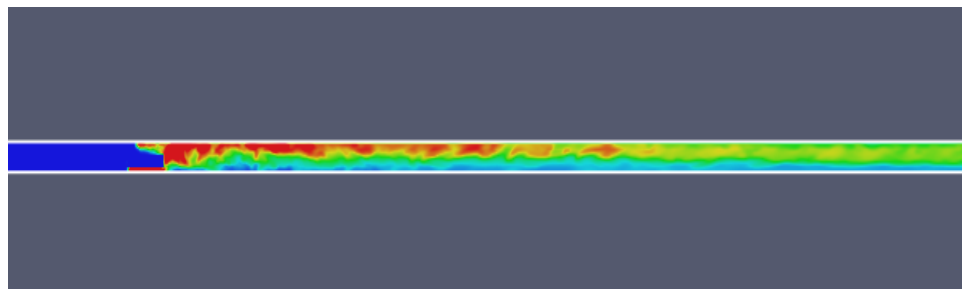
Στο τρίτο σενάριο η ταχύτητα του αέρα είναι 2 m/s.

Τα SLICES που χρησιμοποιήθηκαν είναι για τη μέτρηση του μονοξειδίου του άνθρακα, της ορατότητας και της θερμοκρασίας.

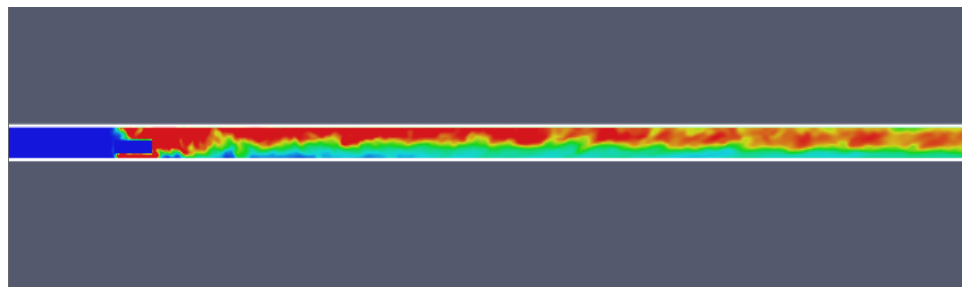
Στην (Εικόνα 27) παρουσιάζονται τα SLICES για το μονοξείδιο του άνθρακα. Παρατηρείται ότι από 900 sec οι τιμές του μονοξειδίου του άνθρακα αυξάνονται στην οροφή της σήραγγας και στη συνέχεια με το πέρασμα του χρόνου στα 1300 sec εξαπλώνονται σταδιακά και στην όδευση διαφυγής (Εικόνα 28). Όπως και στα 1600 sec με το πέρασμα του χρόνου οι τιμές του μονοξειδίου του άνθρακα είναι πολύ υψηλές στην οροφή και στην όδευση διαφυγής (Εικόνα 29).



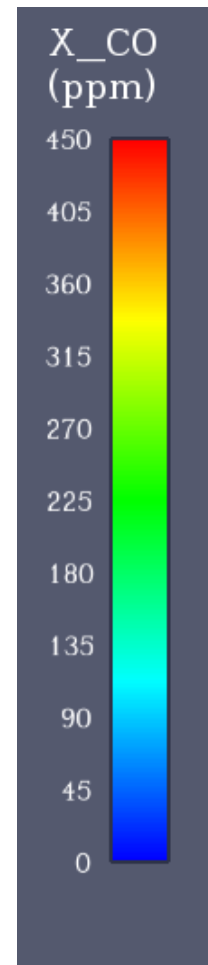
Εικόνα 28: SLICES για το μονοξείδιο του άνθρακα σε χρόνο 900 sec



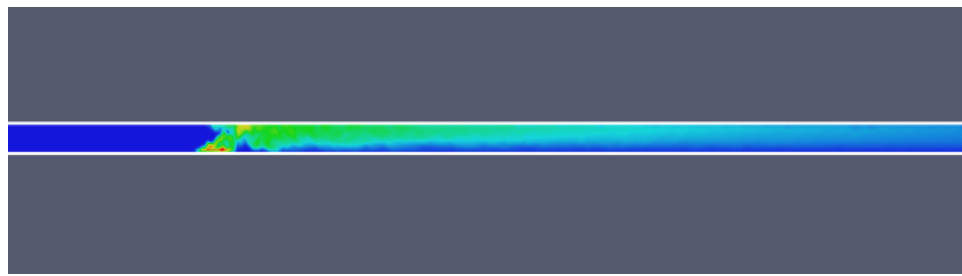
Εικόνα 29:: SLICES για το μονοξείδιο του άνθρακα σε χρόνο 1300 sec



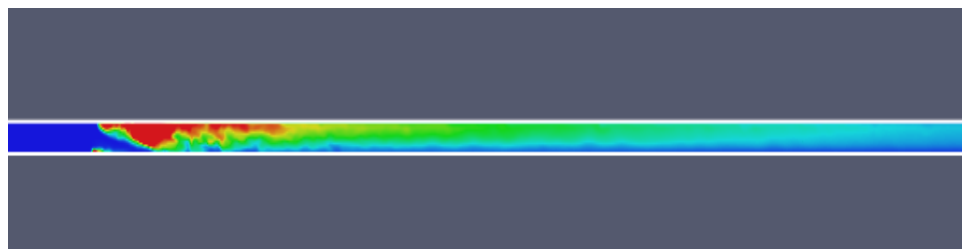
Εικόνα 30:: SLICES για το μονοξείδιο του άνθρακα σε χρόνο 1600 sec



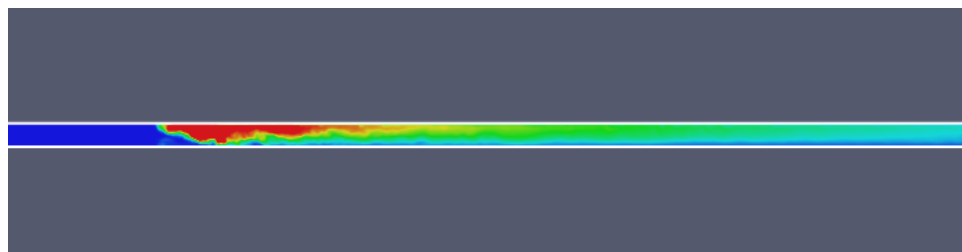
Τα SLICES για την θερμοκρασία παρουσιάζονται στην (Εικόνα 30). Παρατηρείται ότι από 900 sec οι τιμές της θερμοκρασίας αυξάνονται στην οροφή της σήραγγας και στη συνέχεια με το πέρασμα του χρόνου στα 1300 sec εξαπλώνονται σταδιακά και στην όδευση διαφυγής (Εικόνα 31). Ενώ στα 1600 sec με το πέρασμα του χρόνου οι τιμές της θερμοκρασίας είναι πολύ υψηλές στην οροφή και στην όδευση διαφυγής (Εικόνα 32).



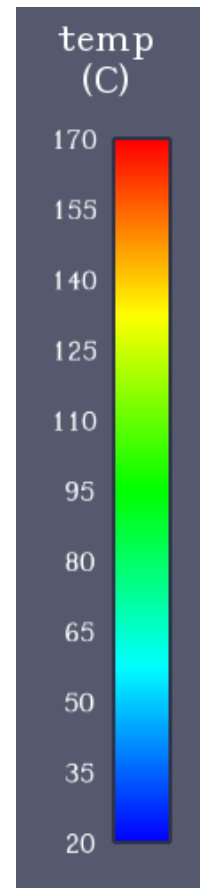
Εικόνα 31: SLICES για τη θερμοκρασία σε χρόνο 900 sec.



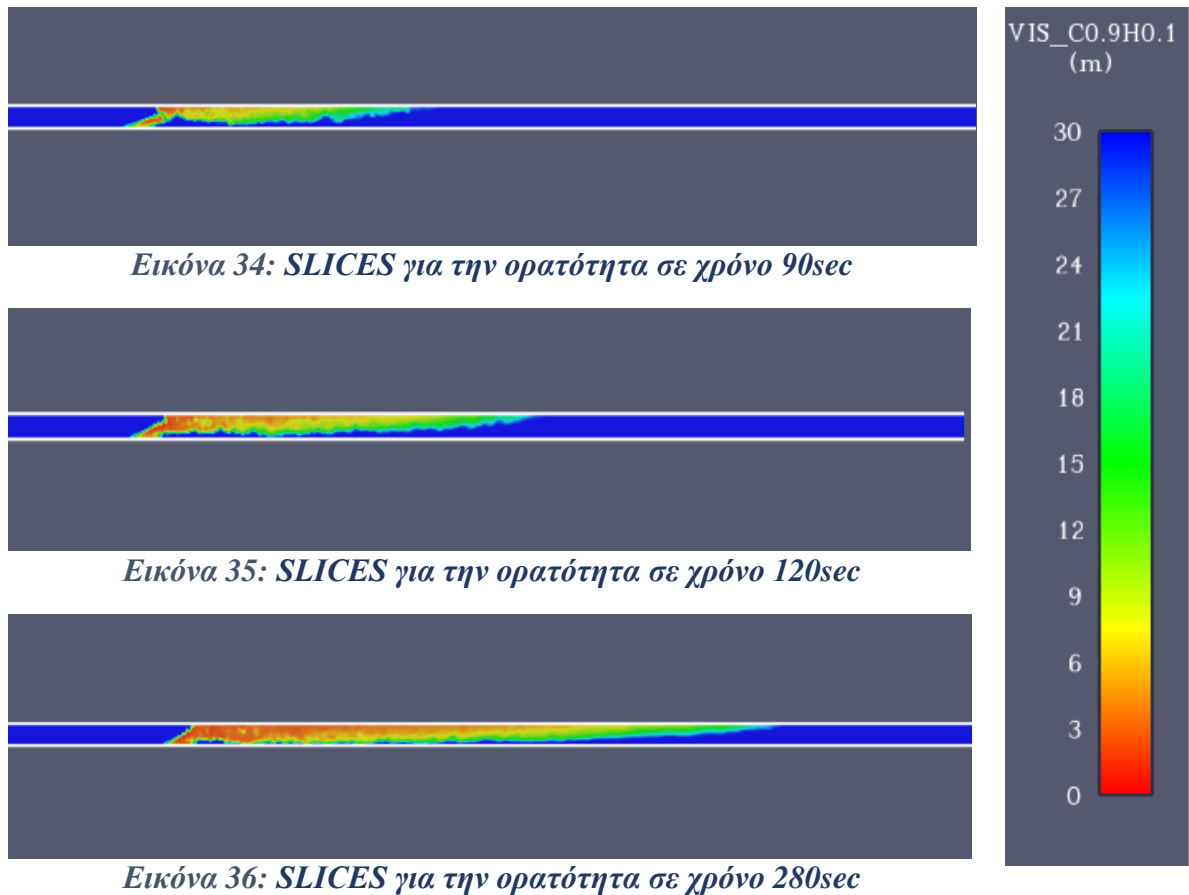
Εικόνα 32: SLICES για τη θερμοκρασία σε χρόνο 1300 sec.



Εικόνα 33: SLICES για τη θερμοκρασία σε χρόνο 1600 sec.



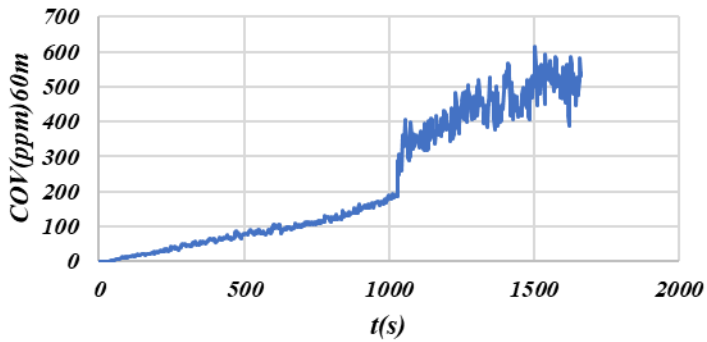
Στην (Εικόνα 33) παρουσιάζονται τα SLICES για την ορατότητα. Παρατηρείται ότι από 90 sec οι τιμές της ορατότητας αυξάνονται στην οροφή της σήραγγας και στη συνέχεια με το πέρασμα του χρόνου στα 120 sec εξαπλώνονται σταδιακά και στην όδευση διαφυγής (Εικόνα 34). Ενώ στα 280 sec με το πέρασμα του χρόνου οι τιμές της ορατότητας είναι πολύ υψηλές στην οροφή και στην όδευση διαφυγής (Εικόνα 35).



Από τα DEVICES που τοποθετήθηκαν σε διάφορα κρίσιμα σημεία της σήραγγας όπως στην οροφή της σήραγγας και στην όδευση διαφυγής παρουσιάζονται παρακάτω.

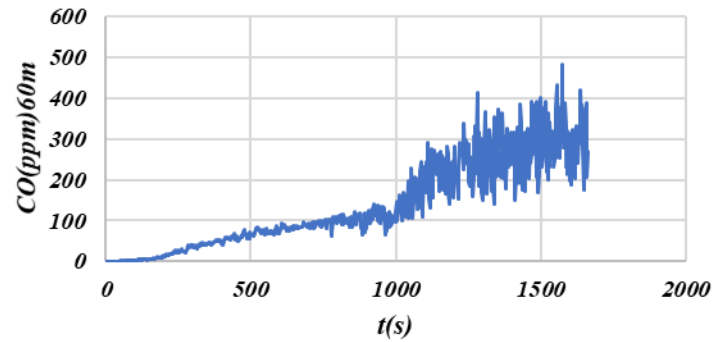
- Σε απόσταση 60 m από την φωτιά παρατηρούνται ότι στα διαγράμματα μονοξειδίου του άνθρακα σε συνάρτηση του χρόνου (Διαγράμματα 66 και 67 αντίστοιχα), οι τιμές COV της οροφής αλλά και το CO της όδευσης διαφυγής αυξάνονται με το πέρασμα του χρόνου. Αντίστοιχα αποτελέσματα λαμβάνονται και από τα διαγράμματα θερμοκρασίας σε συνάρτηση χρόνου (Διαγράμματα 68 και 69 αντίστοιχα). Ποιο συγκεκριμένα στα παραπάνω διαγράμματα παρατηρείται η αύξηση των μελετώμενων τιμών με το πέρασμα του χρόνου. Ενώ στα διαγράμματα της ορατότητας σε συνάρτηση με το χρόνο παρατηρείται η μείωση της ορατότητας με το πέρασμα του χρόνου (Διαγράμματα 70 και 71 αντίστοιχα).

Διάγραμμα COV(ppm)60m-t(s)



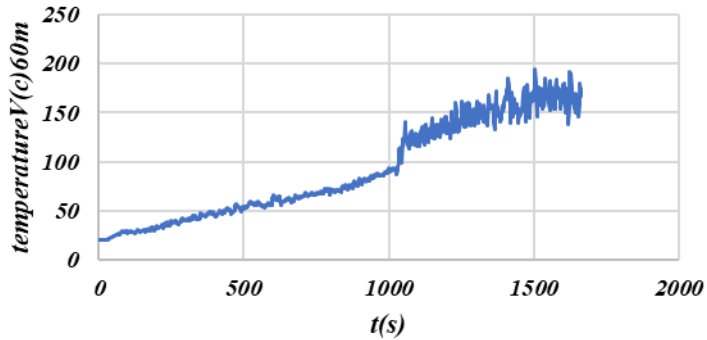
Διάγραμμα 102: Διάγραμμα μονοξείδιο του άνθρακα σε συνάρτηση με το χρόνο, στην οροφή της σήραγγας (απόσταση 60m).

Διάγραμμα CO(ppm)60m-t(s)



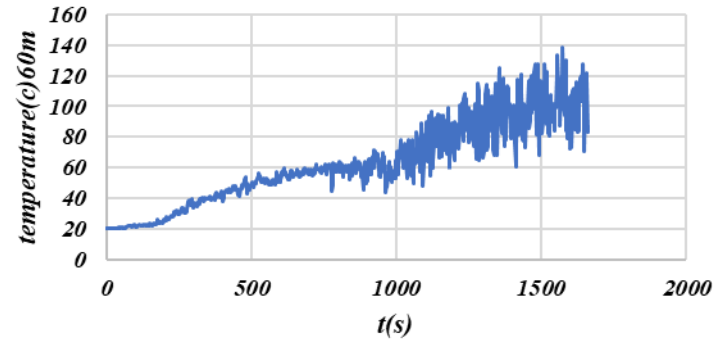
Διάγραμμα 103: Διάγραμμα μονοξείδιο του άνθρακα σε συνάρτηση με το χρόνο, στην όδευση διαφυγής της σήραγγας (απόσταση 60m).

Διάγραμμα temperatureV(c)60m-t(s)



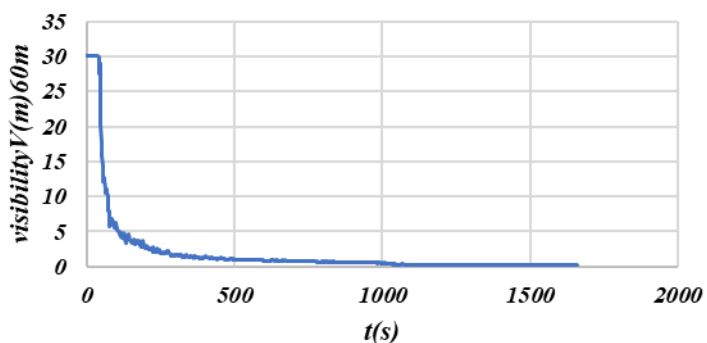
Διάγραμμα 104: Διάγραμμα θερμοκρασίας σε συνάρτηση με το χρόνο, στην οροφή της σήραγγας (απόσταση 60m).

Διάγραμμα temperature(c)60m-t(s)



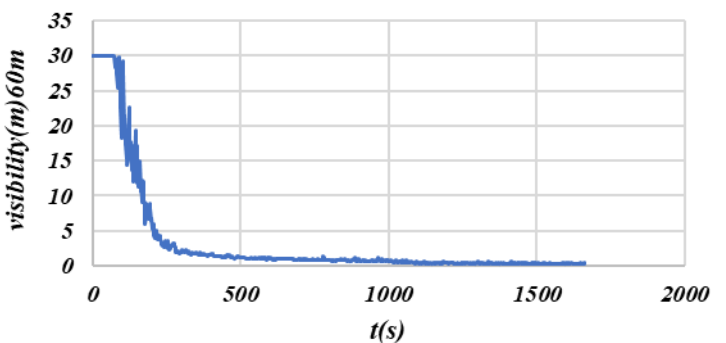
Διάγραμμα 105: Διάγραμμα θερμοκρασίας σε συνάρτηση με το χρόνο, στην όδευση διαφυγής της σήραγγας (απόσταση 60m).

Διάγραμμα visibilityV(m)60m-t(s)



Διάγραμμα 106: Διάγραμμα ορατότητας σε συνάρτηση με το χρόνο, στην οροφή της σήραγγας (απόσταση 60m).

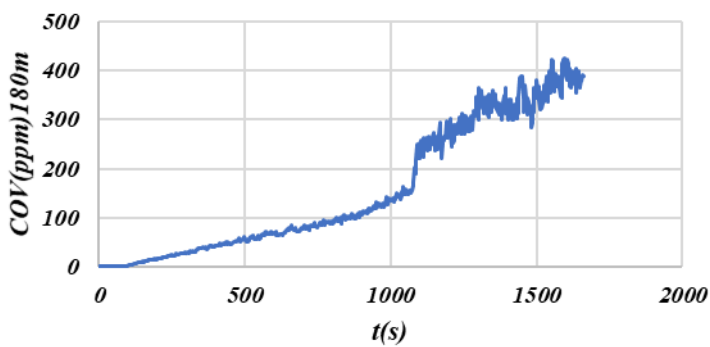
Διάγραμμα visibility(m)60m-t(s)



Διάγραμμα 107: Διάγραμμα ορατότητας σε συνάρτηση με το χρόνο, στην όδευση διαφυγής της σήραγγας (απόσταση 60m).

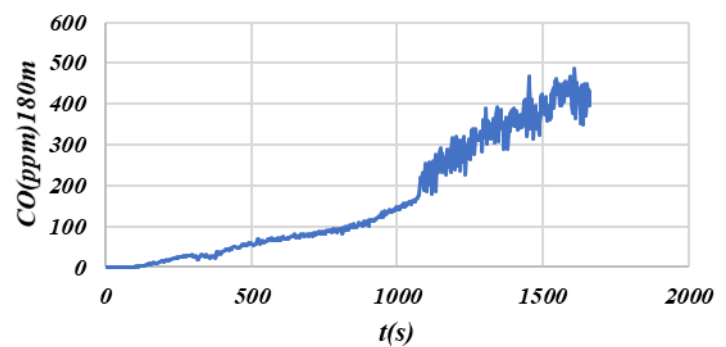
- Σε απόσταση 180 m από την φωτιά παρατηρούνται ότι στα διαγράμματα μονοξειδίου του άνθρακα σε συνάρτησι του χρόνου (Διαγράμματα 72 και 73 αντίστοιχα), οι τιμές COV της οροφής αλλά και το CO της όδευσης διαφυγής αυξάνονται με το πέρασμα του χρόνου. Αντίστοιχα αποτελέσματα λαμβάνονται και από τα διαγράμματα θερμοκρασίας σε συνάρτηση χρόνου (Διαγράμματα 74 και 75 αντίστοιχα). Ποιο συγκεκριμένα στα παραπάνω διαγράμματα παρατηρείται η αύξηση των μελετώμενων τιμών με το πέρασμα του χρόνου. Ενώ στα διαγράμματα της ορατότητας σε συνάρτηση με το χρόνο παρατηρείται η μείωση της ορατότητας με το πέρασμα του χρόνου (Διαγράμματα 76 και 77 αντίστοιχα).

Διάγραμμα COV(ppm)180m-t(s)



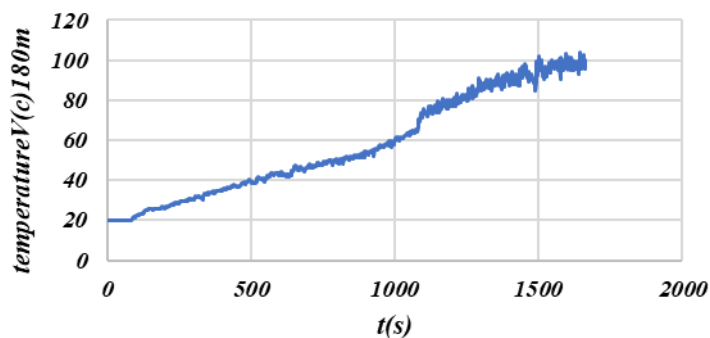
Διάγραμμα 108: Διάγραμμα μονοξειδίου του άνθρακα σε συνάρτηση με το χρόνο, στην οροφή της σήραγγας (απόσταση 180m).

Διάγραμμα CO(ppm)180m-t(s)



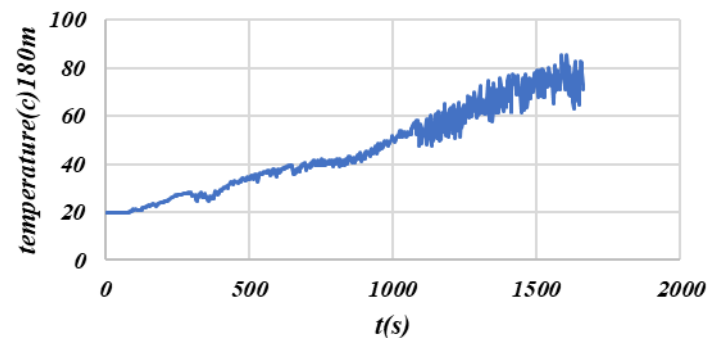
Διάγραμμα 109: Διάγραμμα μονοξειδίου του άνθρακα σε συνάρτηση με το χρόνο, στην όδευση διαφυγής της σήραγγας (απόσταση 180m).

Διάγραμμα temperatureV(c)180m-t(s)

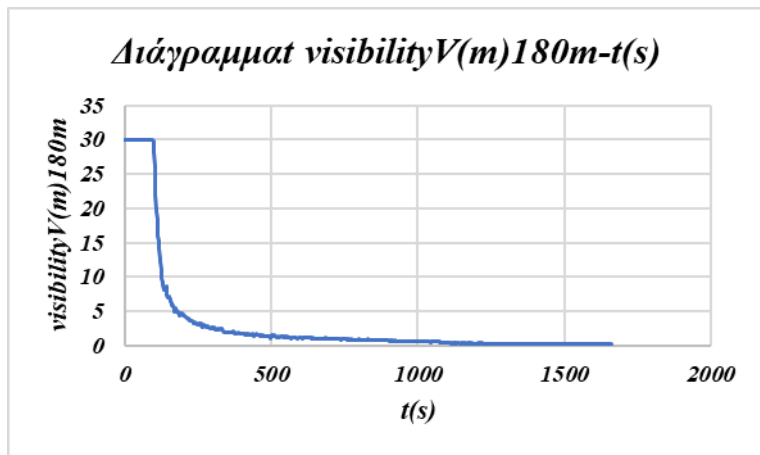


Διάγραμμα 110: Διάγραμμα θερμοκρασίας σε συνάρτηση με το χρόνο, στην οροφή της σήραγγας (απόσταση 180m).

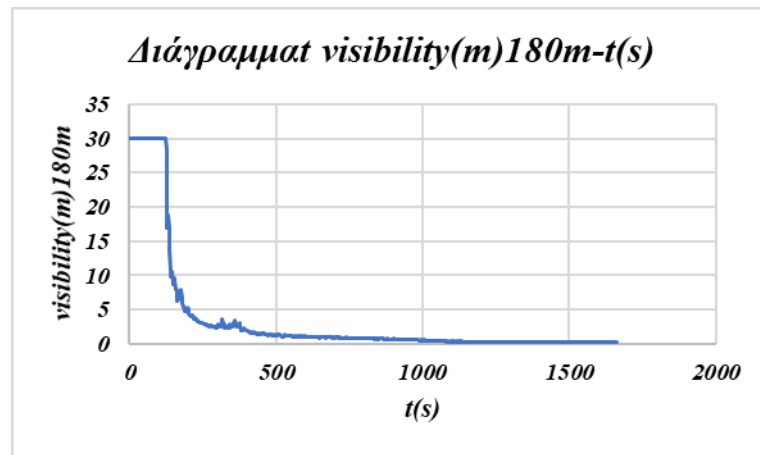
Διάγραμμα temperature(c)180m-t(s)



Διάγραμμα 111: Διάγραμμα θερμοκρασίας σε συνάρτηση με το χρόνο, στην όδευση διαφυγής της σήραγγας (απόσταση 180m).

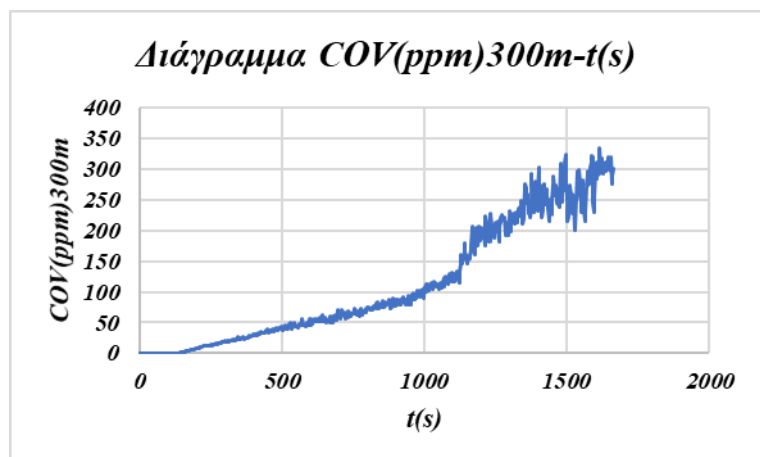


Διάγραμμα 112: Διάγραμμα ορατότητας σε συνάρτηση με το χρόνο, στην οροφή της σήραγγας (απόσταση 180m).

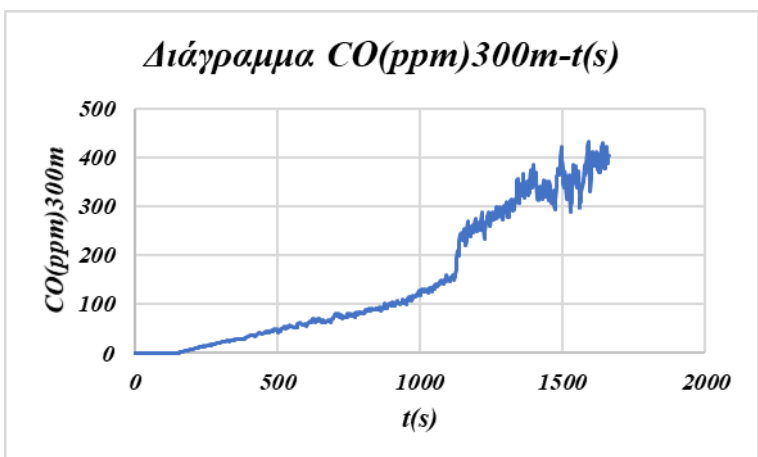


Διάγραμμα 113: Διάγραμμα ορατότητας σε συνάρτηση με το χρόνο, στην όδευση διαφυγής της σήραγγας (απόσταση 180m).

- Σε απόσταση 300 m από την φωτιά παρατηρούνται ότι στα διαγράμματα μονοξειδίου του άνθρακα σε συνάρτηση του χρόνου (Διαγράμματα 78 και 79 αντίστοιχα), οι τιμές COV της οροφής αλλά και το CO της όδευσης διαφυγής αυξάνονται με το πέρασμα του χρόνου. Αντίστοιχα αποτελέσματα λαμβάνονται και από τα διαγράμματα θερμοκρασίας σε συνάρτηση χρόνου (Διαγράμματα 80 και 81 αντίστοιχα). Ποιο συγκεκριμένα στα παραπάνω διαγράμματα παρατηρείται η αύξηση των μελετώμενων τιμών με το πέρασμα του χρόνου. Ενώ στα διαγράμματα της ορατότητας σε συνάρτηση με το χρόνο παρατηρείται η μείωση της ορατότητας με το πέρασμα του χρόνου (Διαγράμματα 82 και 83 αντίστοιχα).

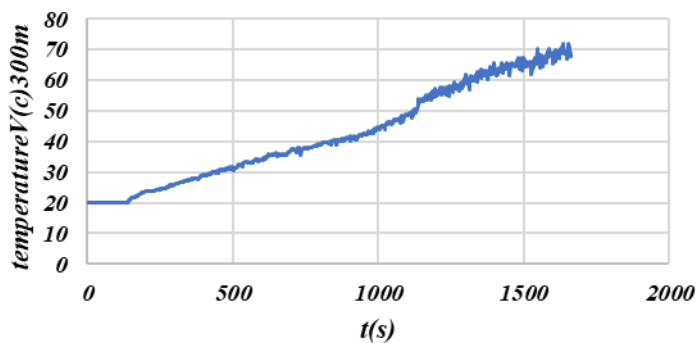


Διάγραμμα 114: Διάγραμμα μονοξειδίου του άνθρακα σε συνάρτηση με το χρόνο, στην οροφή της σήραγγας (απόσταση 300m).



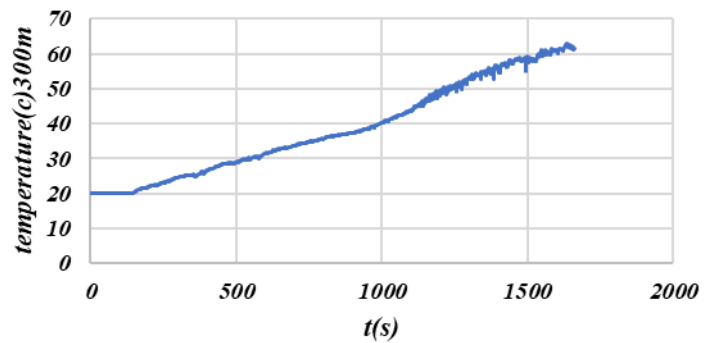
Διάγραμμα 115: Διάγραμμα μονοξειδίου του άνθρακα σε συνάρτηση με το χρόνο, στην όδευση διαφυγής της σήραγγας (απόσταση 300m).

Διάγραμμα temperatureV(c)300m-t(s)



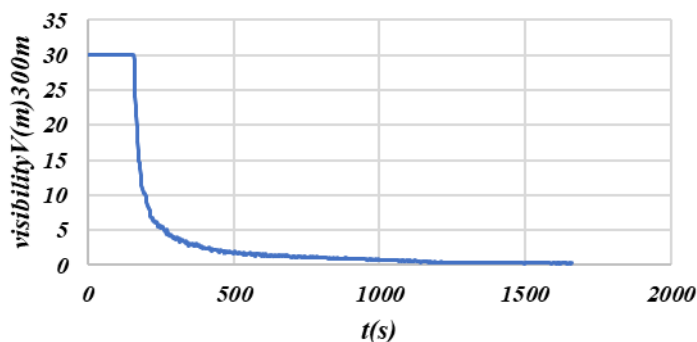
Διάγραμμα 116: Διάγραμμα θερμοκρασίας σε συνάρτηση με το χρόνο, στην οροφή της σήραγγας (απόσταση 300m).

Διάγραμμα temperature(c)300m-t(s)



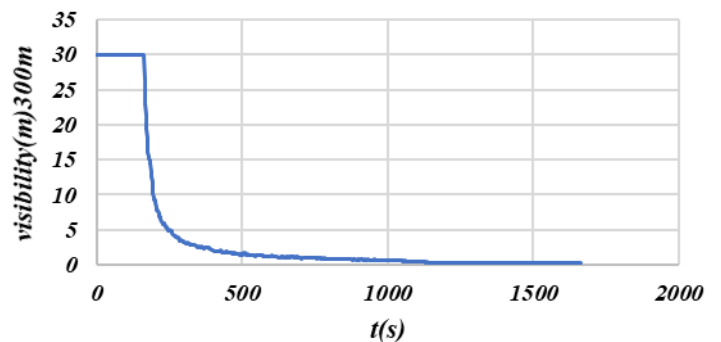
Διάγραμμα 117: Διάγραμμα θερμοκρασίας σε συνάρτηση με το χρόνο, στην όδευση διαφυγής της σήραγγας (απόσταση 300m).

Διάγραμμα visibilityV(m)300m-t(s)



Διάγραμμα 118: Διάγραμμα ορατότητας σε συνάρτηση με το χρόνο, στην οροφή της σήραγγας (απόσταση 300m).

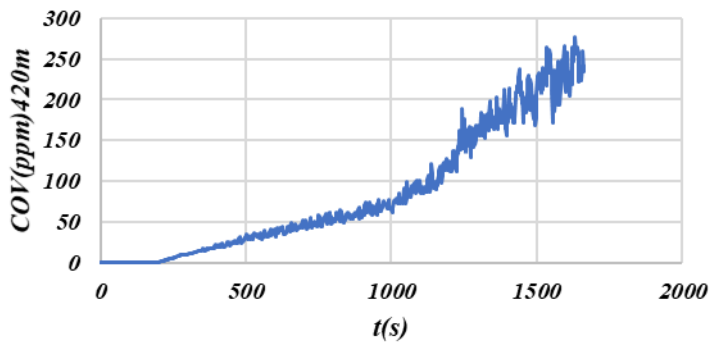
Διάγραμμα visibility(m)300m-t(s)



Διάγραμμα 119: Διάγραμμα ορατότητας σε συνάρτηση με το χρόνο, στην όδευση διαφυγής της σήραγγας (απόσταση 300m).

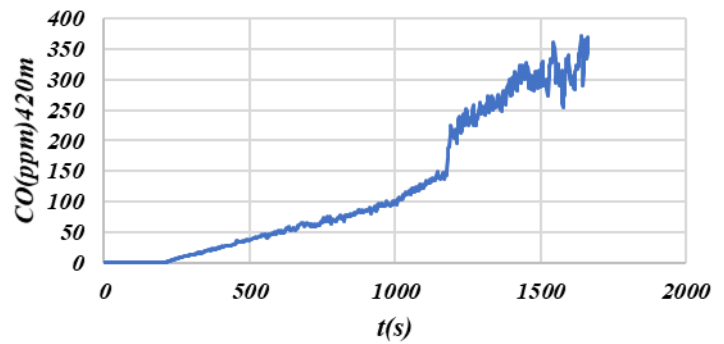
- Σε απόσταση 420 m από την φωτιά παρατηρούνται ότι στα διαγράμματα μονοξειδίου του άνθρακα σε συνάρτηση του χρόνου (Διαγράμματα 84 και 85 αντίστοιχα), οι τιμές COV της οροφής αλλά και το CO της όδευσης διαφυγής αυξάνονται με το πέρασμα του χρόνου. Αντίστοιχα αποτελέσματα λαμβάνονται και από τα διαγράμματα θερμοκρασίας σε συνάρτηση χρόνου (Διαγράμματα 86 και 87 αντίστοιχα). Ποιο συγκεκριμένα στα παραπάνω διαγράμματα παρατηρείται η αύξηση των μελετώμενων τιμών με το πέρασμα του χρόνου. Ενώ στα διαγράμματα της ορατότητας σε συνάρτηση με το χρόνο παρατηρείται η μείωση της ορατότητας με το πέρασμα του χρόνου (Διαγράμματα 88 και 89 αντίστοιχα).

Διάγραμμα COV(ppm)420m-t(s)



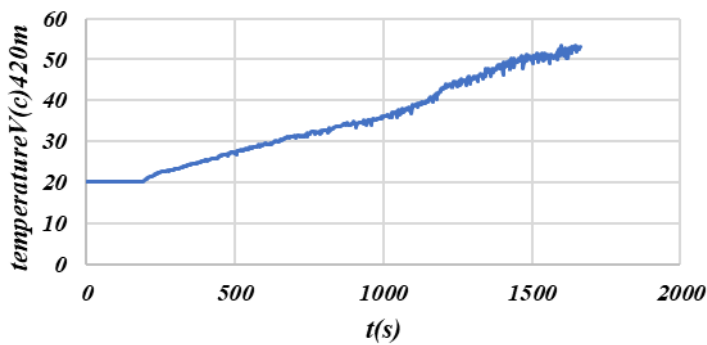
Διάγραμμα 120: Διάγραμμα μονοξείδιο του άνθρακα σε συνάρτηση με το χρόνο, στην οροφή της σήραγγας (απόσταση 420m).

Διάγραμμα CO(ppm)420m-t(s)



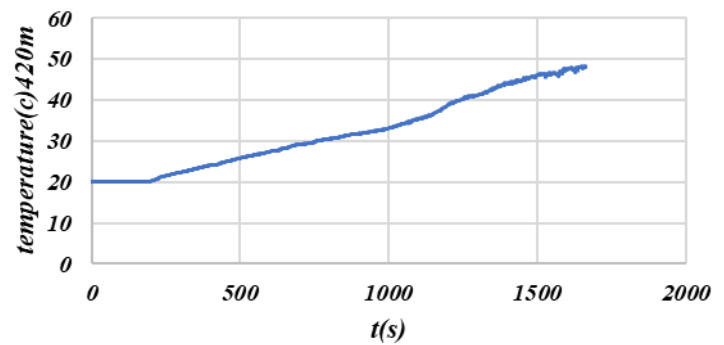
Διάγραμμα 121: Διάγραμμα μονοξείδιο του άνθρακα σε συνάρτηση με το χρόνο, στην όδευση διαφυγής της σήραγγας (απόσταση 420m).

Διάγραμμα temperatureV(c)420m-t(s)



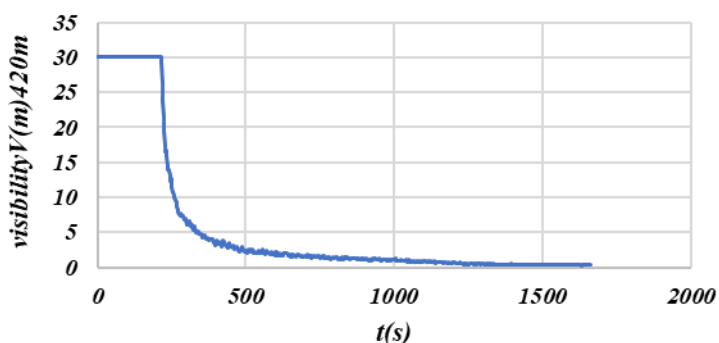
Διάγραμμα 122: Διάγραμμα θερμοκρασίας σε συνάρτηση με το χρόνο, στην οροφή της σήραγγας (απόσταση 420m).

Διάγραμμα temperature(c)420m-t(s)



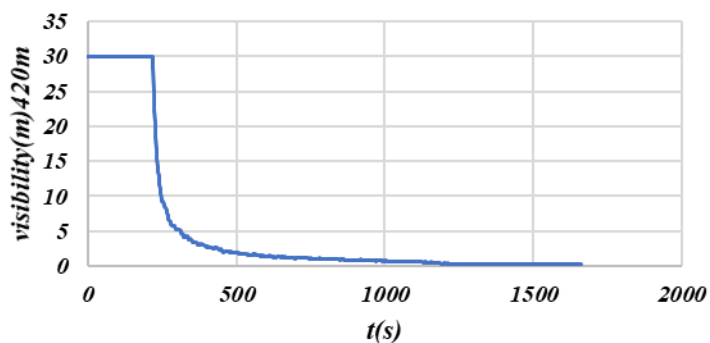
Διάγραμμα 123: Διάγραμμα θερμοκρασίας σε συνάρτηση με το χρόνο, στην όδευση διαφυγής της σήραγγας (απόσταση 420m).

Διάγραμμα visibilityV(m)420m-t(s)



Διάγραμμα 124: Διάγραμμα ορατότητας σε συνάρτηση με το χρόνο, στην οροφή της σήραγγας (απόσταση 420m).

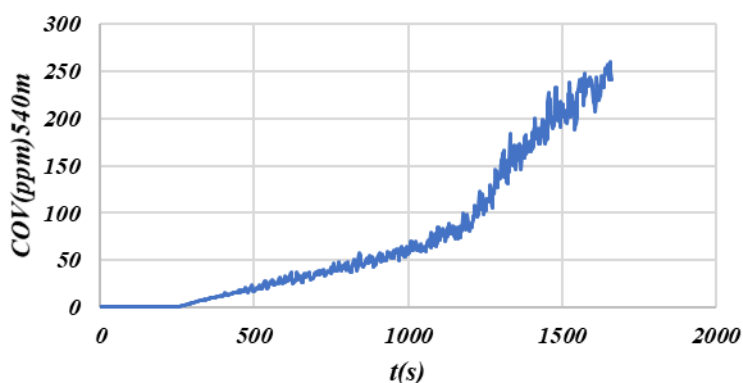
Διάγραμμα visibility(m)420m-t(s)



Διάγραμμα 125: Διάγραμμα ορατότητας σε συνάρτηση με το χρόνο, στην όδευση διαφυγής της σήραγγας (απόσταση 420m).

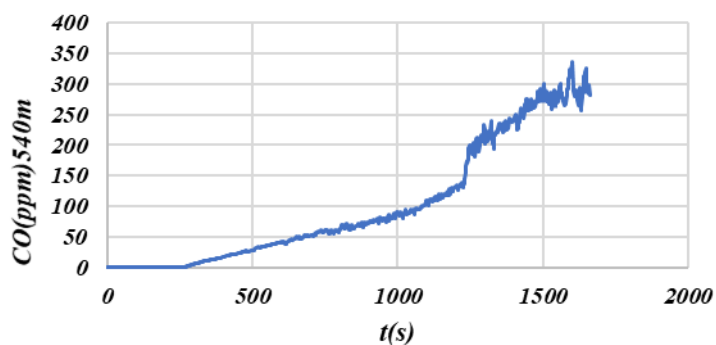
- Σε απόσταση 540 m από την φωτιά παρατηρούνται ότι στα διαγράμματα μονοξειδίου του άνθρακα σε συνάρτηση του χρόνου (Διαγράμματα 90 και 91 αντίστοιχα), οι τιμές COV της οροφής αλλά και το CO της όδευσης διαφυγής αυξάνονται με το πέρασμα του χρόνου. Αντίστοιχα αποτελέσματα λαμβάνονται και από τα διαγράμματα θερμοκρασίας σε συνάρτηση χρόνου (Διαγράμματα 92 και 63 αντίστοιχα). Ποιο συγκεκριμένα στα παραπάνω διαγράμματα παρατηρείται η αύξηση των μελετώμενων τιμών με το πέρασμα του χρόνου. Ενώ στα διαγράμματα της ορατότητας σε συνάρτηση με το χρόνο παρατηρείται η μείωση της ορατότητας με το πέρασμα του χρόνου (Διαγράμματα 94 και 95 αντίστοιχα).

Διάγραμμα COV(ppm)540m-t(s)



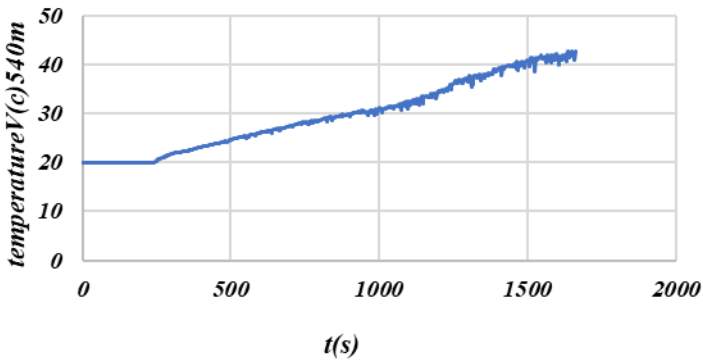
Διάγραμμα 126: Διάγραμμα μονοξειδίου του άνθρακα σε συνάρτηση με το χρόνο, στην οροφή της σήραγγας (απόσταση 540m).

Διάγραμμα CO(ppm)540m-t(s)



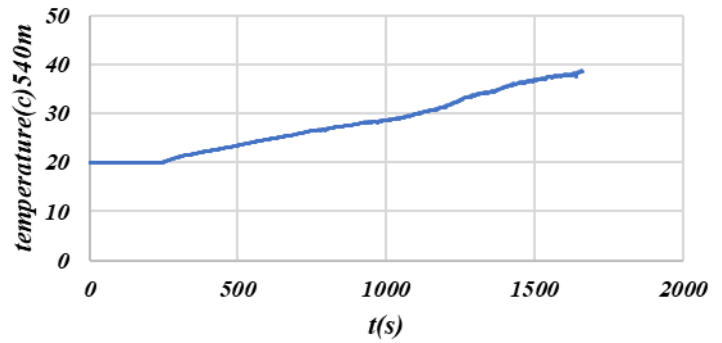
Διάγραμμα 127: Διάγραμμα μονοξειδίου του άνθρακα σε συνάρτηση με το χρόνο, στην όδευση διαφυγής της σήραγγας (απόσταση 540m).

Διάγραμμα temperatureV(c)540m-t(s)



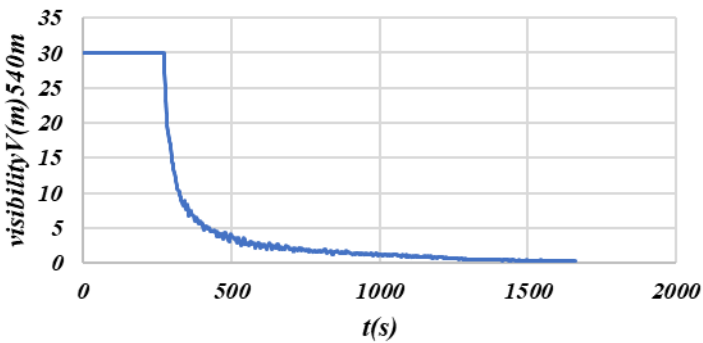
Διάγραμμα 128: Διάγραμμα θερμοκρασίας σε συνάρτηση με το χρόνο, στην οροφή της σήραγγας (απόσταση 540m).

Διάγραμμα temperature(c)540m-t(s)



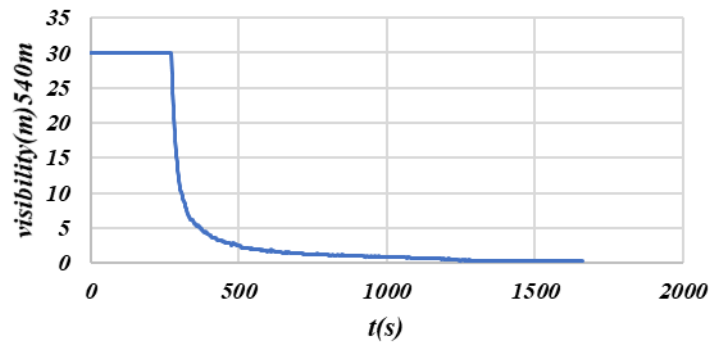
Διάγραμμα 129: Διάγραμμα θερμοκρασίας σε συνάρτηση με το χρόνο, στην όδευση διαφυγής της σήραγγας (απόσταση 540m).

Διάγραμμα visibilityV(m)540m-t(s)



Διάγραμμα 130: Διάγραμμα ορατότητας σε συνάρτηση με το χρόνο, στην οροφή της σήραγγας (απόσταση 540m).

Διάγραμμα visibility(m)540m-t(s)



Διάγραμμα 131: Διάγραμμα ορατότητας σε συνάρτηση με το χρόνο, στην όδευση διαφυγής της σήραγγας (απόσταση 540m).

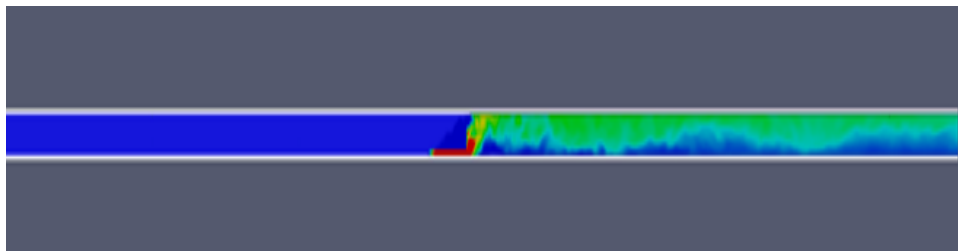
4.2.4 Σενάριο 4

Στο τέταρτο σενάριο η ταχύτητα του αέρα είναι 3 m/s.

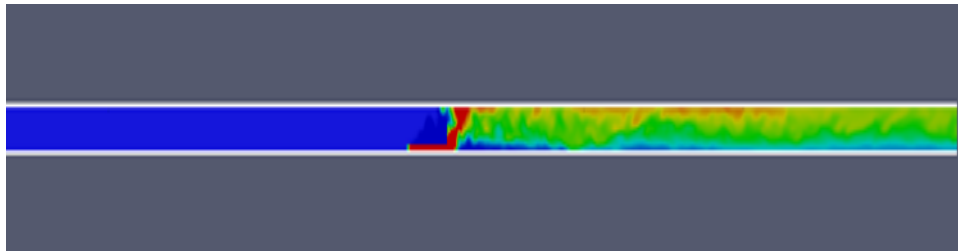
Τα SLICES που χρησιμοποιήθηκαν είναι για τη μέτρηση του μονοξειδίου του άνθρακα, της ορατότητας και της θερμοκρασίας.

Στην (Εικόνα 36) παρουσιάζονται τα SLICES για το μονοξείδιο του άνθρακα. Παρατηρείται ότι από 900 sec οι τιμές του μονοξειδίου του άνθρακα αυξάνονται στην οροφή της σήραγγας και στη συνέχεια με το πέρασμα του χρόνου στα 1300 sec εξαπλώνονται σταδιακά και στην όδευση διαφυγής (Εικόνα 37). Όπως και στα 1600

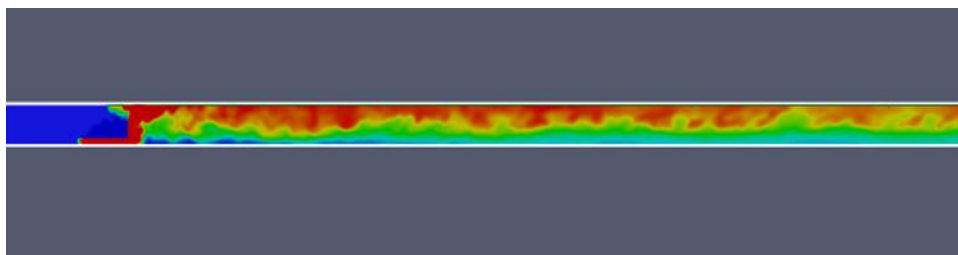
sec με το πέρασμα του χρόνου οι τιμές του μονοξειδίου του άνθρακα είναι πολύ υψηλές στην οροφή και στην όδευση διαφυγής (Εικόνα 38).



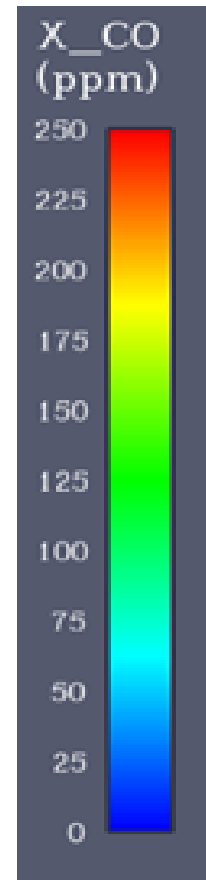
Εικόνα 37: SLICES για το μονοξείδιο του άνθρακα σε χρόνο 900 sec



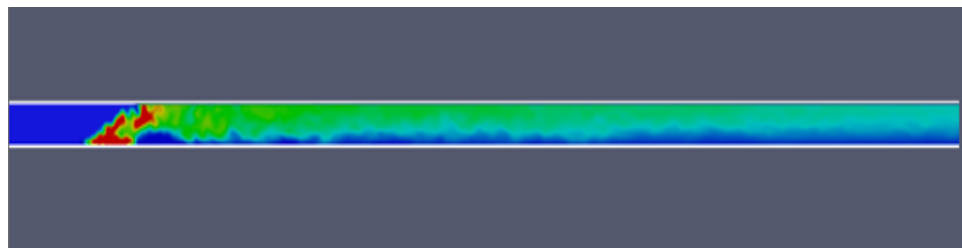
Εικόνα 38: SLICES για το μονοξείδιο του άνθρακα σε χρόνο 1300 sec



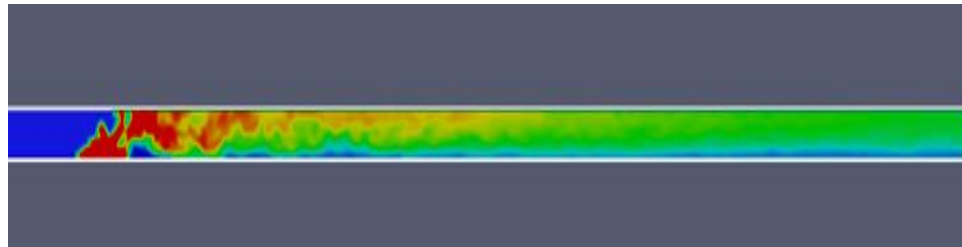
Εικόνα 39: SLICES για το μονοξείδιο του άνθρακα σε χρόνο 1600 sec



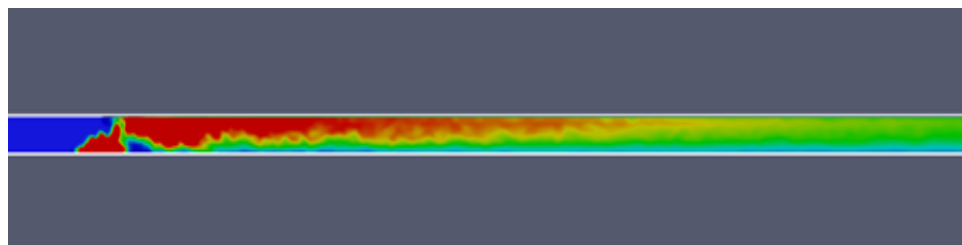
Τα SLICES για την θερμοκρασία παρουσιάζονται στην (Εικόνα 39). Παρατηρείται ότι από 900 sec οι τιμές της θερμοκρασίας αυξάνονται στην οροφή της σήραγγας και στη συνέχεια με το πέρασμα του χρόνου στα 1300 sec εξαπλώνονται σταδιακά και στην όδευση διαφυγής (Εικόνα 40). Ενώ στα 1600 sec με το πέρασμα του χρόνου οι τιμές της θερμοκρασίας είναι πολύ υψηλές στην οροφή και στην όδευση διαφυγής (Εικόνα 41).



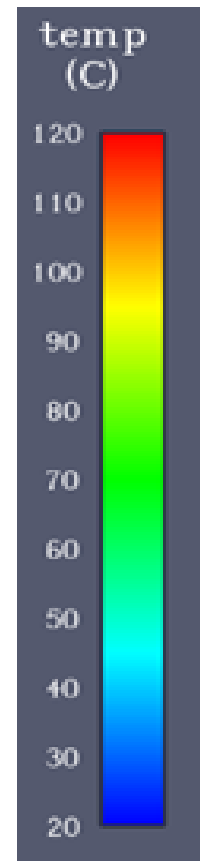
Εικόνα 40: SLICES για τη θερμοκρασία σε χρόνο 900 sec.



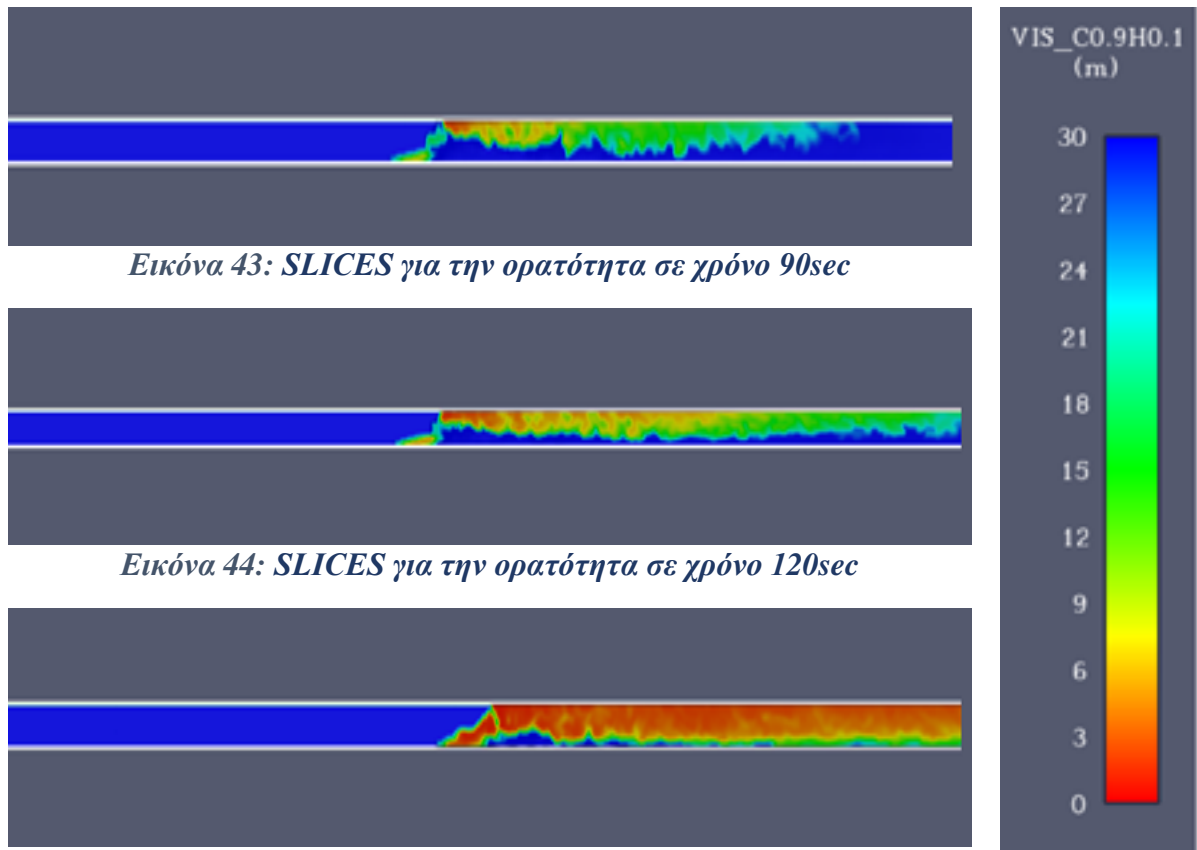
Εικόνα 41: SLICES για τη θερμοκρασία σε χρόνο 1300 sec.



Εικόνα 42: SLICES για τη θερμοκρασία σε χρόνο 1600 sec.



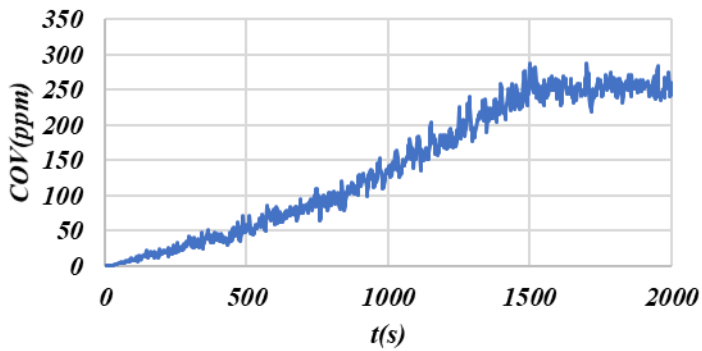
Στην (Εικόνα 42) παρουσιάζονται τα SLICES για την ορατότητα. Παρατηρείται ότι από 90 sec οι τιμές της ορατότητας αυξάνονται στην οροφή της σήραγγας και στη συνέχεια με το πέρασμα του χρόνου στα 120 sec εξαπλώνονται σταδιακά και στην όδευση διαφυγής (Εικόνα 43). Ενώ στα 280 sec με το πέρασμα του χρόνου οι τιμές της ορατότητας είναι πολύ υψηλές στην οροφή και στην όδευση διαφυγής (Εικόνα 44).



Από τα DEVICES που τοποθετήθηκαν σε διάφορα κρίσιμα σημεία της σήραγγας όπως στην οροφή της σήραγγας και στην όδευση διαφυγής παρουσιάζονται παρακάτω.

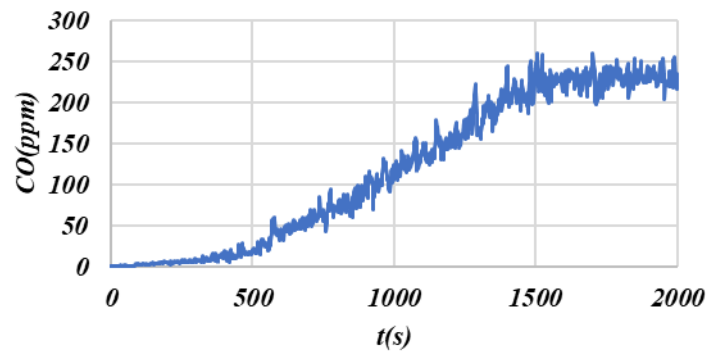
- Σε απόσταση 60 m από την φωτιά παρατηρούνται ότι στα διαγράμματα μονοξειδίου του άνθρακα σε συνάρτηση του χρόνου (Διαγράμματα 96 και 97 αντίστοιχα), οι τιμές COV της οροφής αλλά και το CO της όδευσης διαφυγής αυξάνονται με το πέρασμα του χρόνου. Αντίστοιχα αποτελέσματα λαμβάνονται και από τα διαγράμματα θερμοκρασίας σε συνάρτηση χρόνου (Διαγράμματα 98 και 99 αντίστοιχα). Ποιο συγκεκριμένα στα παραπάνω διαγράμματα παρατηρείται η αύξηση των μελετώμενων τιμών με το πέρασμα του χρόνου. Ενώ στα διαγράμματα της ορατότητας σε συνάρτηση με το χρόνο παρατηρείται η μείωση της ορατότητας με το πέρασμα του χρόνου (Διαγράμματα 101 και 102 αντίστοιχα).

Διάγραμμα COV(ppm)60m-t(s)



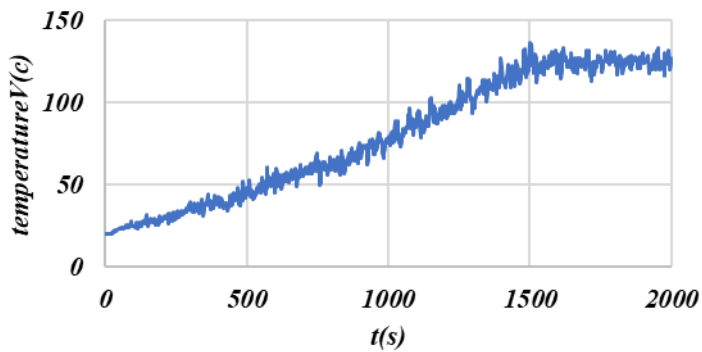
Διάγραμμα 132: Διάγραμμα μονοξείδιο του άνθρακα σε συνάρτηση με το χρόνο, στην οροφή της σήραγγας (απόσταση 60m).

Διάγραμμα CO(ppm)60m-t(s)



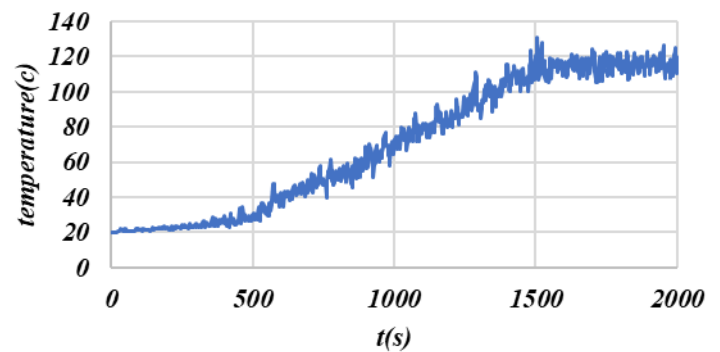
Διάγραμμα 133: Διάγραμμα μονοξείδιο του άνθρακα σε συνάρτηση με το χρόνο, στην όδευση διαφυγής της σήραγγας (απόσταση 60m).

Διάγραμμα temperatureV(c)60m-t(s)



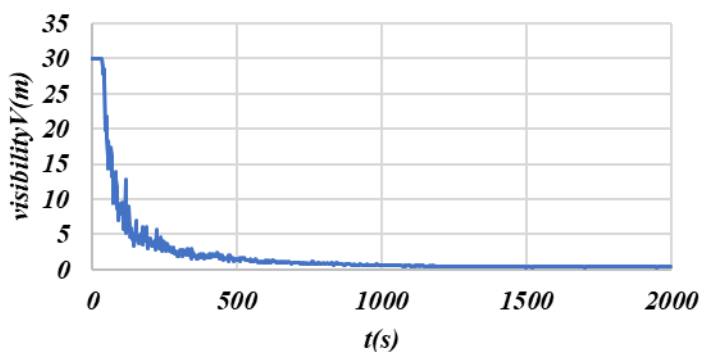
Διάγραμμα 134: Διάγραμμα θερμοκρασίας σε συνάρτηση με το χρόνο, στην οροφή της σήραγγας (απόσταση 60m).

Διάγραμμα temperature(c)60m-t(s)



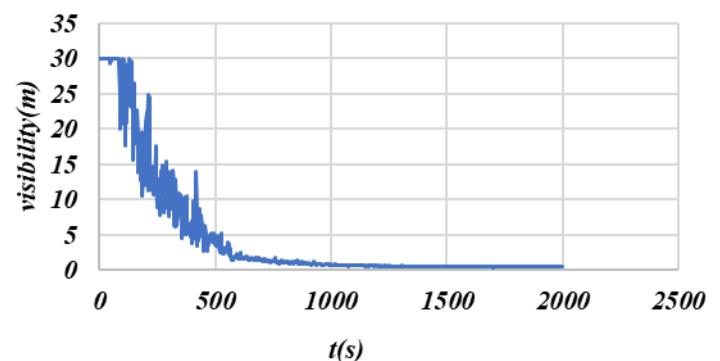
Διάγραμμα 135: Διάγραμμα θερμοκρασίας σε συνάρτηση με το χρόνο, στην όδευση διαφυγής της σήραγγας (απόσταση 60m).

Διάγραμμα visibilityV(m)60m-t(s)



Διάγραμμα 136: Διάγραμμα ορατότητας σε συνάρτηση με το χρόνο, στην οροφή της σήραγγας (απόσταση 60m).

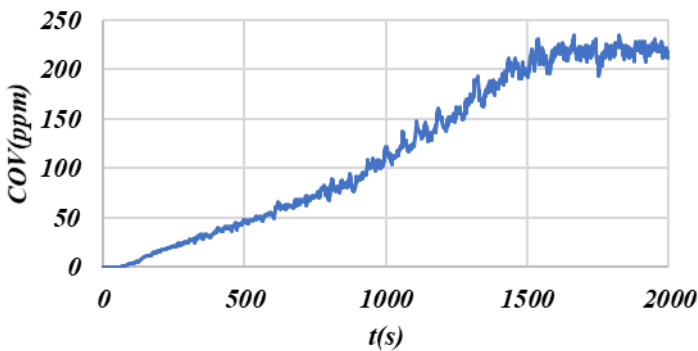
Διάγραμμα visibility(m)60m-t(s)



Διάγραμμα 137: Διάγραμμα ορατότητας σε συνάρτηση με το χρόνο, στην όδευση διαφυγής της σήραγγας (απόσταση 60m).

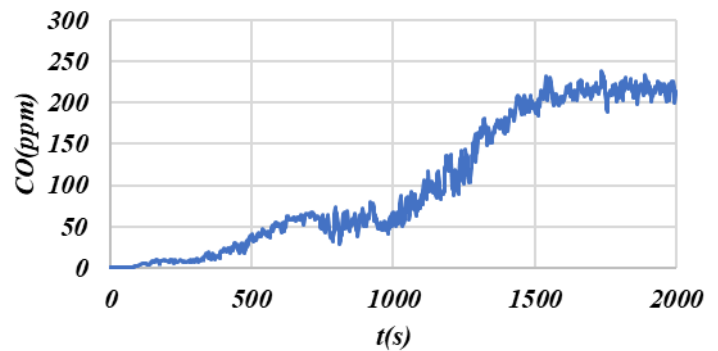
- Σε απόσταση 180 m από την φωτιά παρατηρούνται ότι στα διαγράμματα μονοξειδίου του άνθρακα σε συνάρτησι του χρόνου (Διαγράμματα 102 και 103 αντίστοιχα), οι τιμές COV της οροφής αλλά και το CO της όδευσης διαφυγής αυξάνονται με το πέρασμα του χρόνου. Αντίστοιχα αποτελέσματα λαμβάνονται και από τα διαγράμματα θερμοκρασίας σε συνάρτηση χρόνου (Διαγράμματα 104 και 105 αντίστοιχα). Ποιο συγκεκριμένα στα παραπάνω διαγράμματα παρατηρείται η αύξηση των μελετώμενων τιμών με το πέρασμα του χρόνου. Ενώ στα διαγράμματα της ορατότητας σε συνάρτηση με το χρόνο παρατηρείται η μείωση της ορατότητας με το πέρασμα του χρόνου (Διαγράμματα 106 και 107 αντίστοιχα).

Διάγραμμα COV(ppm)180m-t(s)



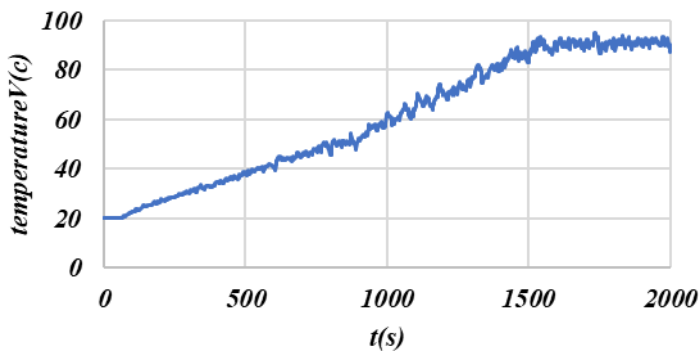
Διάγραμμα 138: Διάγραμμα μονοξειδίου του άνθρακα σε συνάρτηση με το χρόνο, στην οροφή της σήραγγας (απόσταση 180m).

Διάγραμμα CO(ppm)180m-t(s)



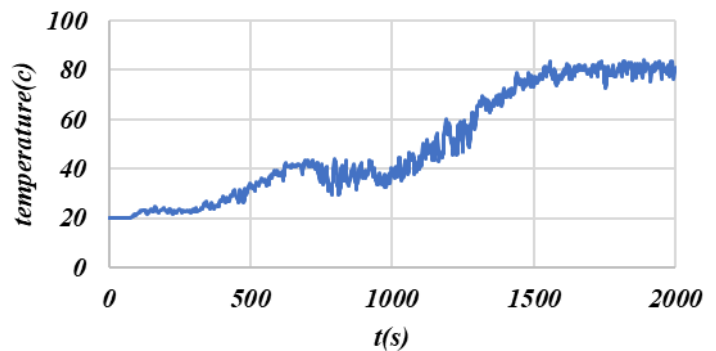
Διάγραμμα 139: Διάγραμμα μονοξειδίου του άνθρακα σε συνάρτηση με το χρόνο, στην όδευση διαφυγής της σήραγγας (απόσταση 180m).

Διάγραμμα temperatureV(c)180m-t(s)

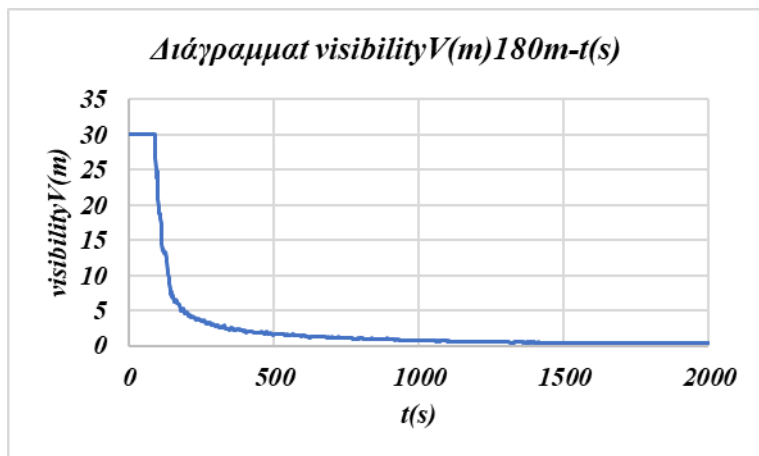


Διάγραμμα 140: Διάγραμμα θερμοκρασίας σε συνάρτηση με το χρόνο, στην οροφή της σήραγγας (απόσταση 180m).

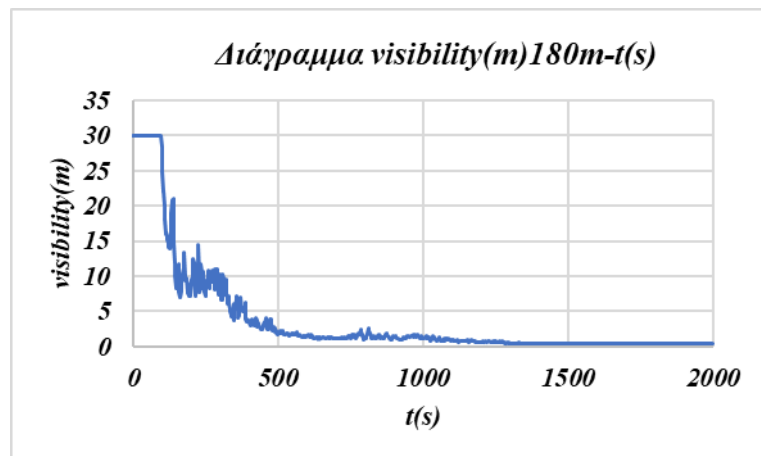
Διάγραμμα temperature(c)180m-t(s)



Διάγραμμα 141: Διάγραμμα θερμοκρασίας σε συνάρτηση με το χρόνο, στην όδευση διαφυγής της σήραγγας (απόσταση 180m).

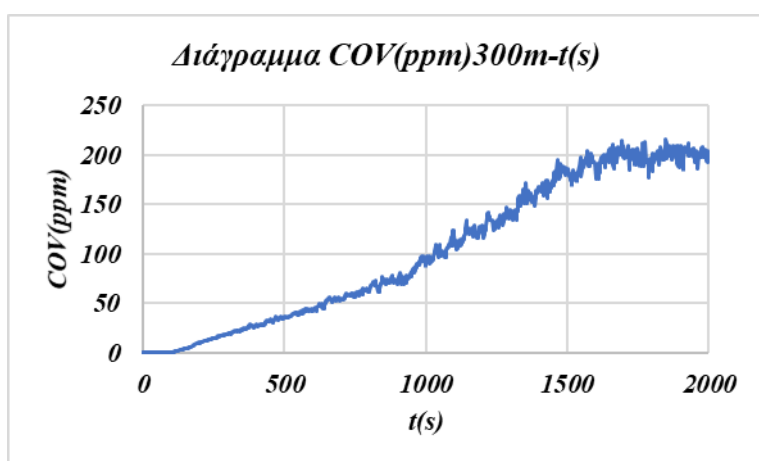


Διάγραμμα 142: Διάγραμμα ορατότητας σε συνάρτηση με το χρόνο, στην οροφή της σήραγγας (απόσταση 180m).

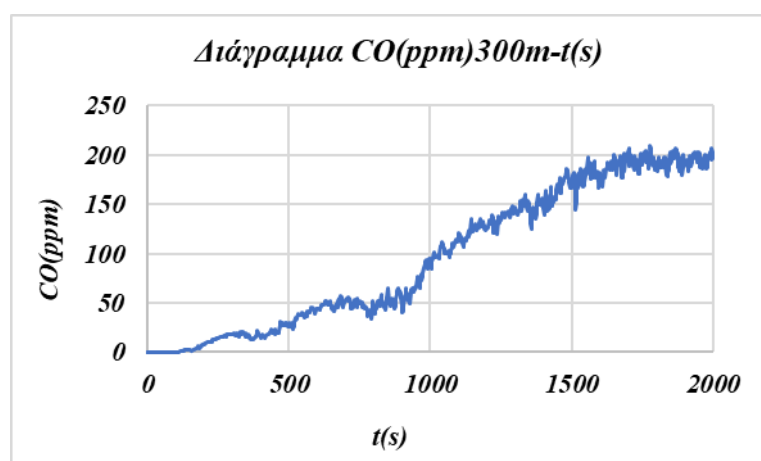


Διάγραμμα 143: Διάγραμμα ορατότητας σε συνάρτηση με το χρόνο, στην όδευση διαφυγής της σήραγγας (απόσταση 180m).

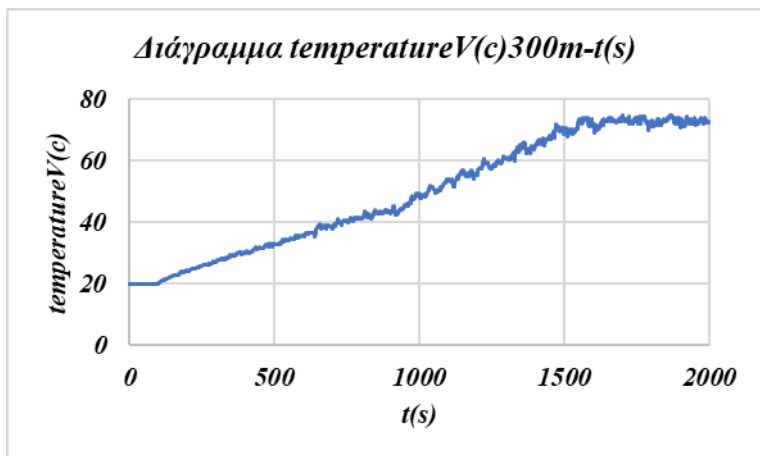
- Σε απόσταση 300 m από την φωτιά παρατηρούνται ότι στα διαγράμματα μονοξειδίου του άνθρακα σε συνάρτηση του χρόνου (Διαγράμματα 108 και 109 αντίστοιχα), οι τιμές COV της οροφής αλλά και το CO της όδευσης διαφυγής αυξάνονται με το πέρασμα του χρόνου. Αντίστοιχα αποτελέσματα λαμβάνονται και από τα διαγράμματα θερμοκρασίας σε συνάρτηση χρόνου (Διαγράμματα 110 και 111 αντίστοιχα). Ποιο συγκεκριμένα στα παραπάνω διαγράμματα παρατηρείται η αύξηση των μελετώμενων τιμών με το πέρασμα του χρόνου. Ενώ στα διαγράμματα της ορατότητας σε συνάρτηση με το χρόνο παρατηρείται η μείωση της ορατότητας με το πέρασμα του χρόνου (Διαγράμματα 112 και 113 αντίστοιχα).



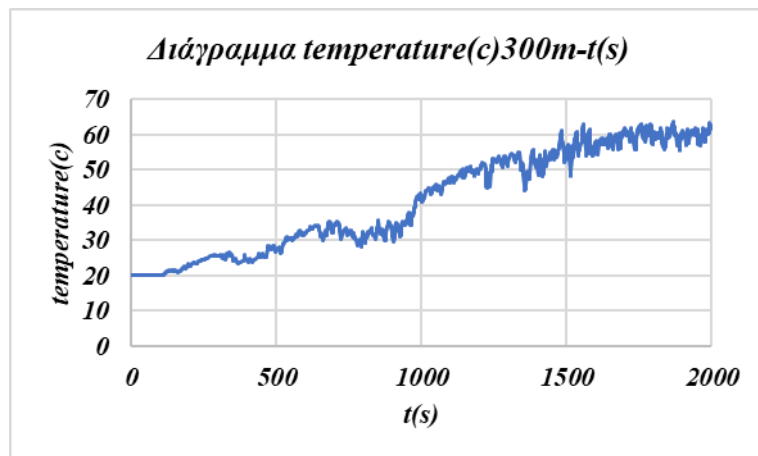
Διάγραμμα 144: Διάγραμμα μονοξειδίου του άνθρακα σε συνάρτηση με το χρόνο, στην οροφή της σήραγγας (απόσταση 300m).



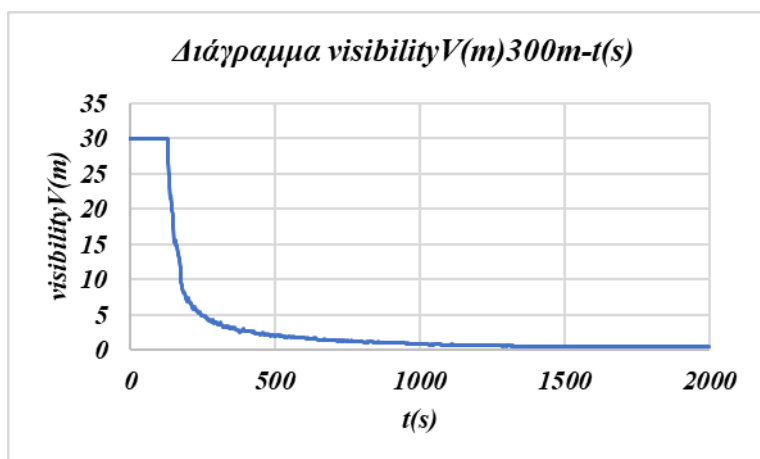
Διάγραμμα 145: Διάγραμμα μονοξειδίου του άνθρακα σε συνάρτηση με το χρόνο, στην όδευση διαφυγής της σήραγγας (απόσταση 300m).



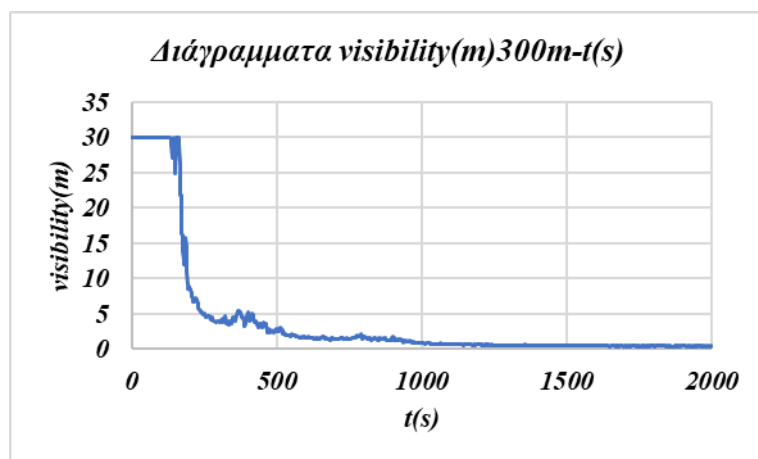
Διάγραμμα 146: Διάγραμμα θερμοκρασίας σε συνάρτηση με το χρόνο, στην οροφή της σήραγγας (απόσταση 300m).



Διάγραμμα 147: Διάγραμμα θερμοκρασίας σε συνάρτηση με το χρόνο, στην όδευση διαφυγής της σήραγγας (απόσταση 300m).



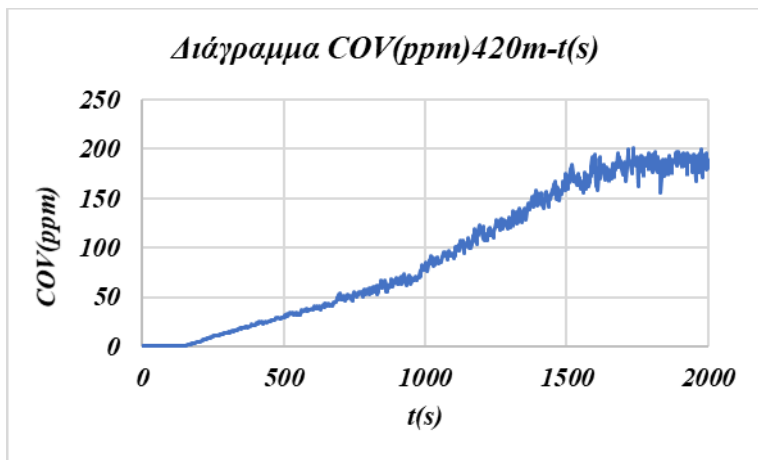
Διάγραμμα 148: Διάγραμμα ορατότητας σε συνάρτηση με το χρόνο, στην οροφή της σήραγγας (απόσταση 300m).



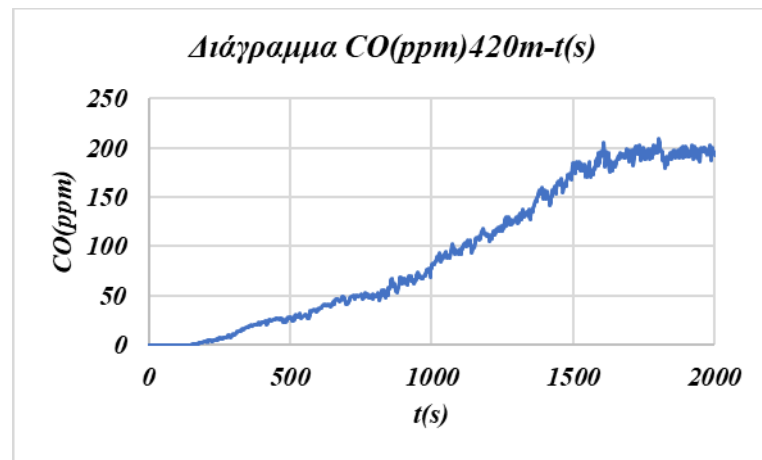
Διάγραμμα 149: Διάγραμμα ορατότητας σε συνάρτηση με το χρόνο, στην όδευση διαφυγής της σήραγγας (απόσταση 300m).

- Σε απόσταση 420 m από την φωτιά παρατηρούνται ότι στα διαγράμματα μονοξειδίου του άνθρακα σε συνάρτηση του χρόνου (Διαγράμματα 114 και 115 αντίστοιχα), οι τιμές COV της οροφής αλλά και το CO της όδευσης διαφυγής αυξάνονται με το πέρασμα του χρόνου. Αντίστοιχα αποτελέσματα λαμβάνονται και από τα διαγράμματα θερμοκρασίας σε συνάρτηση χρόνου (Διαγράμματα 116 και 117 αντίστοιχα). Ποιο συγκεκριμένα στα παραπάνω διαγράμματα παρατηρείται η αύξηση των μελετώμενων τιμών με το πέρασμα του χρόνου. Ενώ στα διαγράμματα

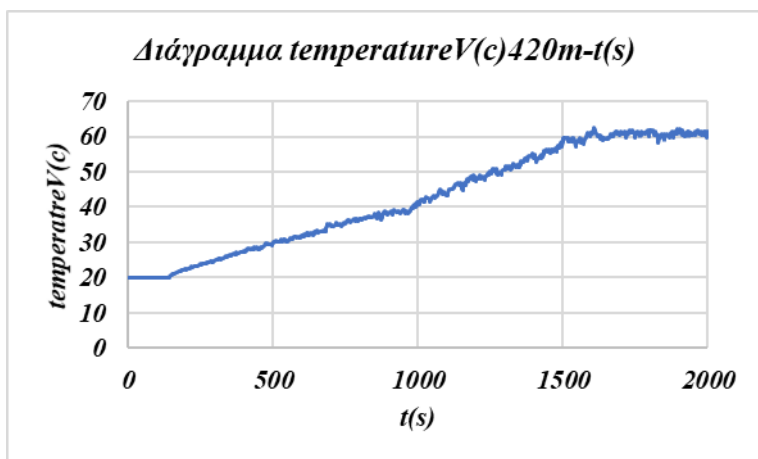
της ορατότητας σε συνάρτηση με το χρόνο παρατηρείται η μείωση της ορατότητας με το πέρασμα του χρόνου (Διαγράμματα 118 και 119 αντίστοιχα).



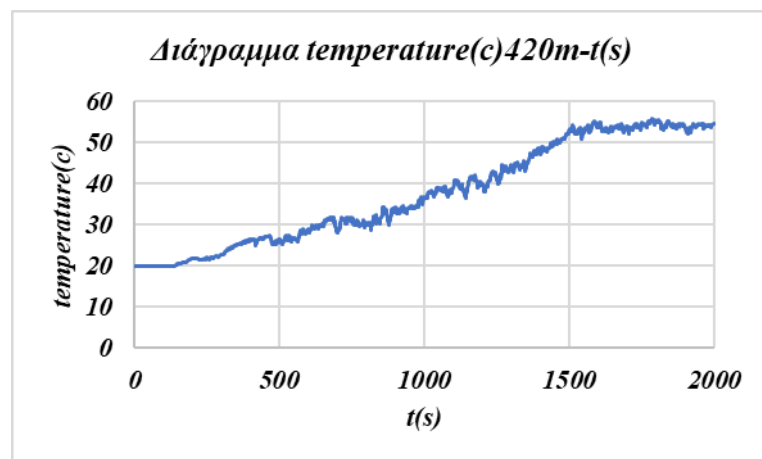
Διάγραμμα 150: Διάγραμμα μονοξείδιο του άνθρακα σε συνάρτηση με το χρόνο, στην οροφή της σήραγγας (απόσταση 420m).



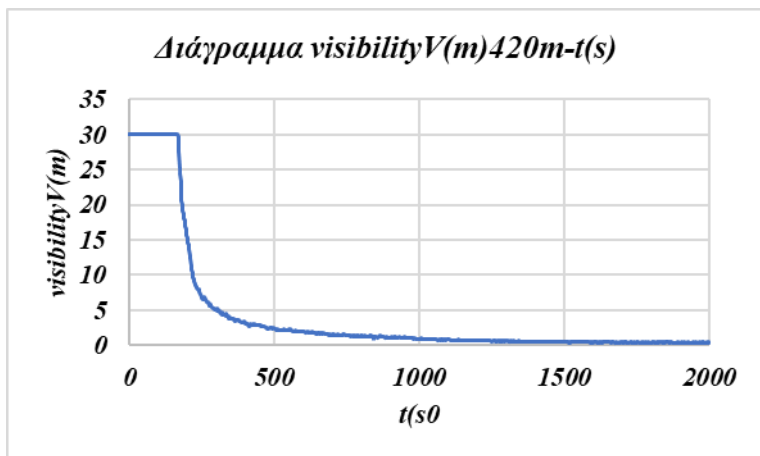
Διάγραμμα 151: Διάγραμμα μονοξείδιο του άνθρακα σε συνάρτηση με το χρόνο, στην όδευση διαφυγής της σήραγγας (απόσταση 420m).



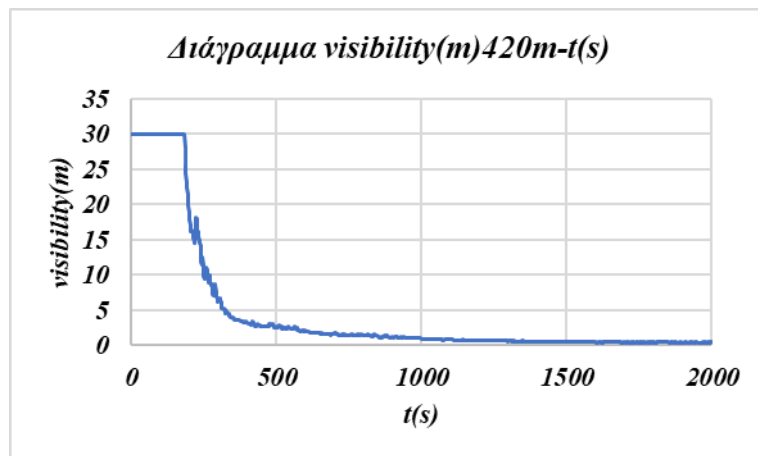
Διάγραμμα 152: Διάγραμμα θερμοκρασίας σε συνάρτηση με το χρόνο, στην οροφή της σήραγγας (απόσταση 420m).



Διάγραμμα 153: Διάγραμμα θερμοκρασίας σε συνάρτηση με το χρόνο, στην όδευση διαφυγής της σήραγγας (απόσταση 420m).

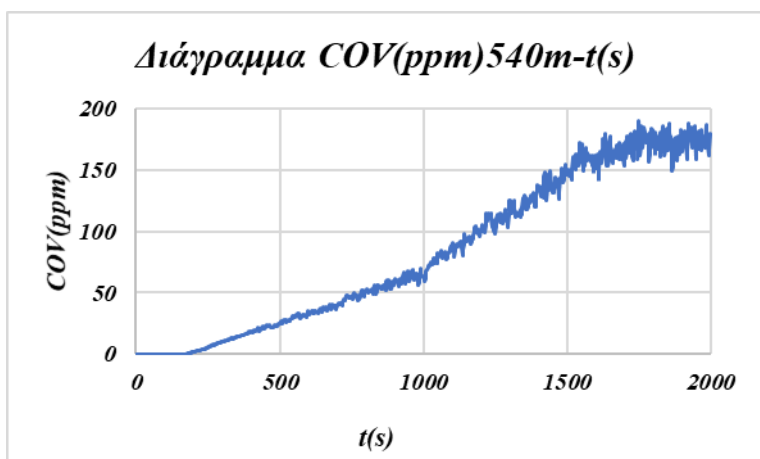


Διάγραμμα 154: Διάγραμμα ορατότητας σε συνάρτηση με το χρόνο, στην οροφή της σήραγγας (απόσταση 420m).

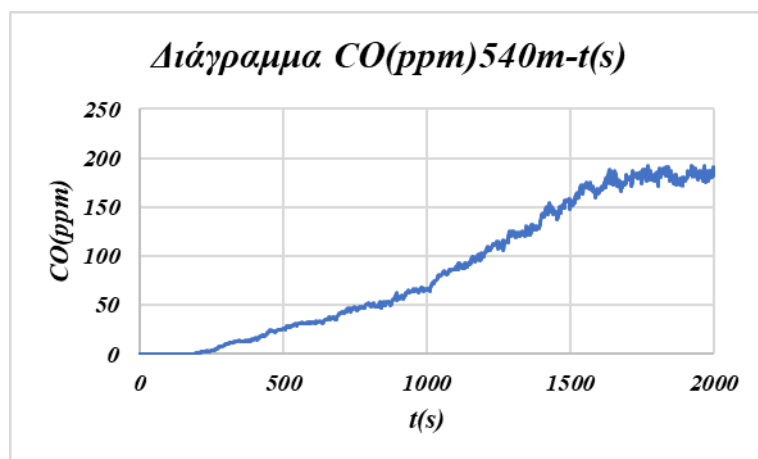


Διάγραμμα 155: Διάγραμμα ορατότητας σε συνάρτηση με το χρόνο, στην όδευση διαφυγής της σήραγγας (απόσταση 420m).

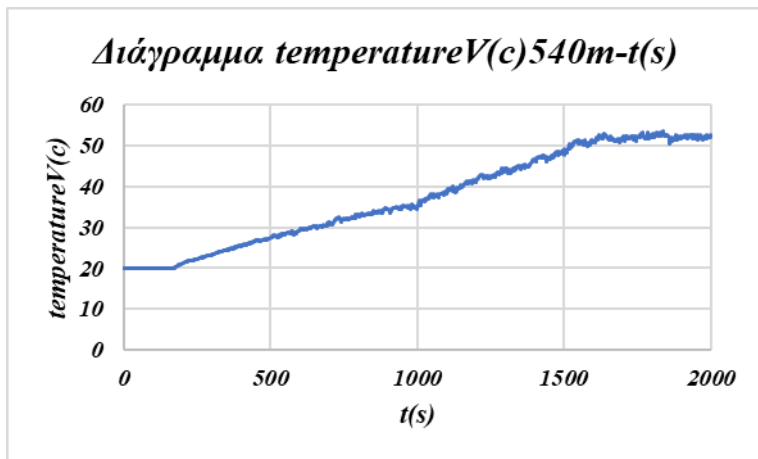
- Σε απόσταση 540 m από την φωτιά παρατηρούνται ότι στα διαγράμματα μονοξειδίου του άνθρακα σε συνάρτηση του χρόνου (Διαγράμματα 120 και 121 αντίστοιχα), οι τιμές COV της οροφής αλλά και το CO της όδευσης διαφυγής αυξάνονται με το πέρασμα του χρόνου. Αντίστοιχα αποτελέσματα λαμβάνονται και από τα διαγράμματα θερμοκρασίας σε συνάρτηση χρόνου (Διαγράμματα 122 και 123 αντίστοιχα). Ποιο συγκεκριμένα στα παραπάνω διαγράμματα παρατηρείται η αύξηση των μελετώμενων τιμών με το πέρασμα του χρόνου. Ενώ στα διαγράμματα της ορατότητας σε συνάρτηση με το χρόνο παρατηρείται η μείωση της ορατότητας με το πέρασμα του χρόνου (Διαγράμματα 124 και 125 αντίστοιχα).



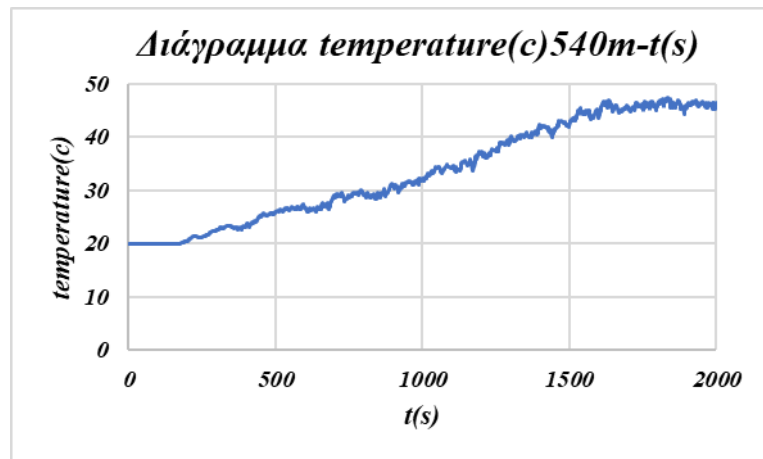
Διάγραμμα 156: Διάγραμμα μονοξειδίου του άνθρακα σε συνάρτηση με το χρόνο, στην οροφή της σήραγγας (απόσταση 540m).



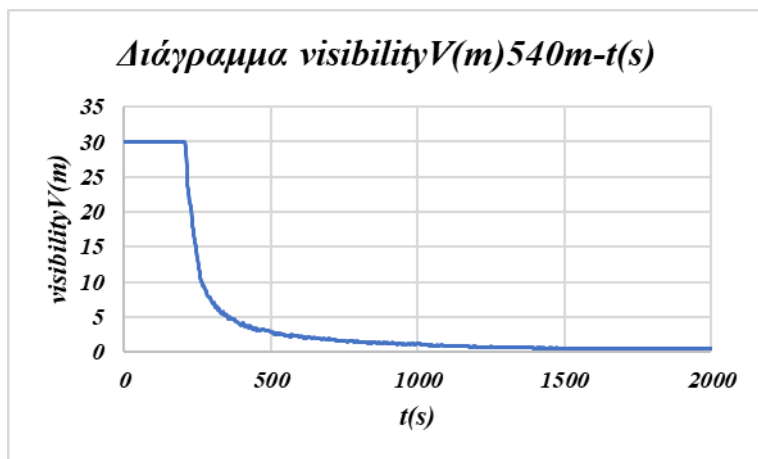
Διάγραμμα 157: Διάγραμμα μονοξειδίου του άνθρακα σε συνάρτηση με το χρόνο, στην όδευση διαφυγής της σήραγγας (απόσταση 540m).



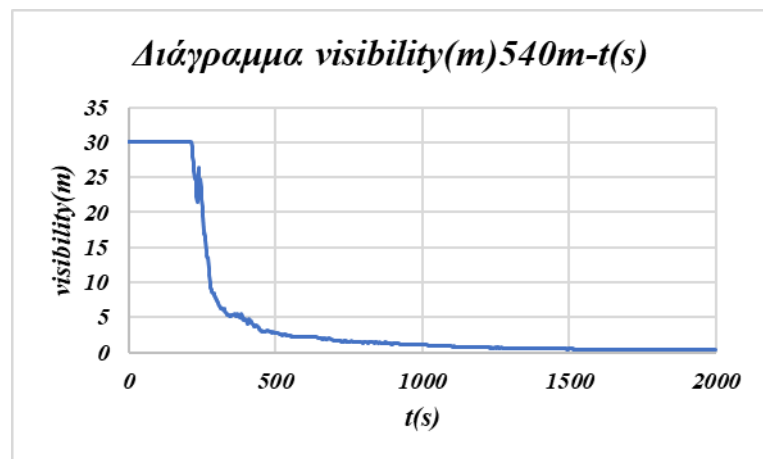
Διάγραμμα 158: Διάγραμμα θερμοκρασίας σε συνάρτηση με το χρόνο, στην οροφή της σήραγγας (απόσταση 540m).



Διάγραμμα 159: Διάγραμμα θερμοκρασίας σε συνάρτηση με το χρόνο, στην όδευση διαφυγής της σήραγγας (απόσταση 540m).



Διάγραμμα 160: Διάγραμμα ορατότητας σε συνάρτηση με το χρόνο, στην οροφή της σήραγγας (απόσταση 540m).



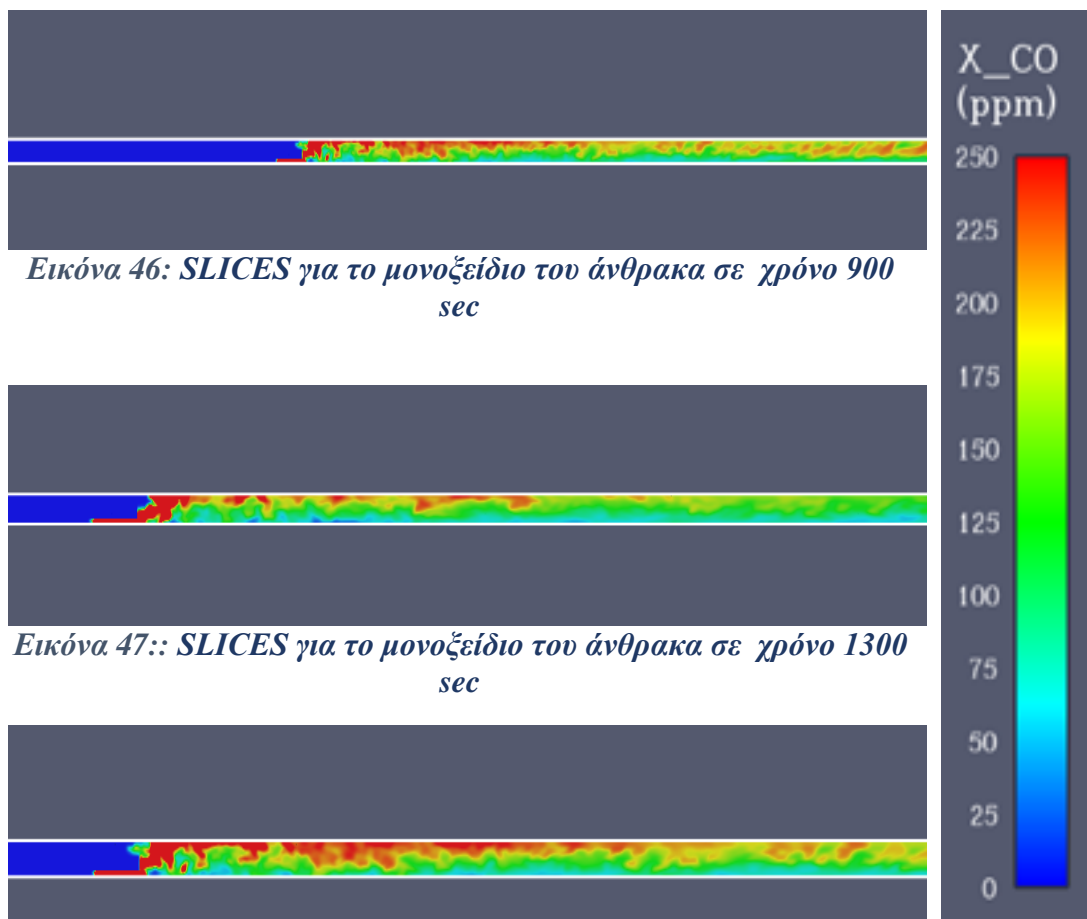
Διάγραμμα 161: Διάγραμμα ορατότητας σε συνάρτηση με το χρόνο, στην όδευση διαφυγής της σήραγγας (απόσταση 540m).

4.2.5 Σενάριο 5

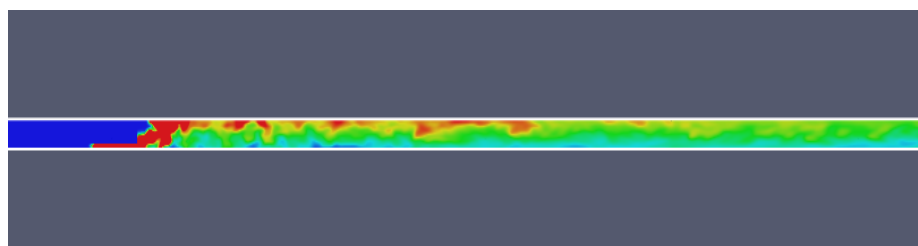
Στο πέμπτο σενάριο η ταχύτητα του αέρα είναι 4 m/s.

Τα SLICES που χρησιμοποιήθηκαν είναι για τη μέτρηση του μονοξειδίου του άνθρακα, της ορατότητας και της θερμοκρασίας.

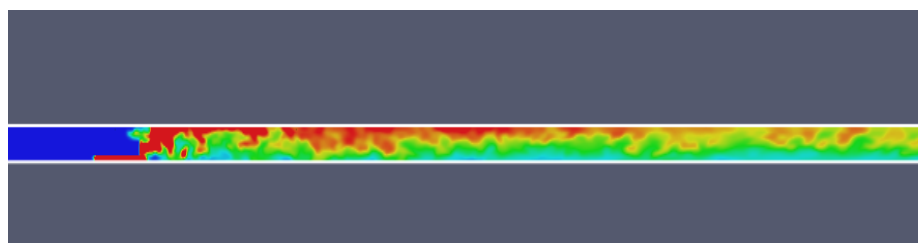
Στην (Εικόνα 45) παρουσιάζονται τα SLICES για το μονοξείδιο του άνθρακα. Παρατηρείται ότι από 900 sec οι τιμές του μονοξειδίου του άνθρακα αυξάνονται στην οροφή της σήραγγας και στη συνέχεια με το πέρασμα του χρόνου στα 1300 sec εξαπλώνονται σταδιακά και στην όδευση διαφυγής (Εικόνα 46). Όπως και στα 1600 sec με το πέρασμα του χρόνου οι τιμές του μονοξειδίου του άνθρακα είναι πολύ υψηλές στην οροφή και στην όδευση διαφυγής (Εικόνα 47)



Εικόνα 46: SLICES για το μονοξείδιο του άνθρακα σε χρόνο 900 sec

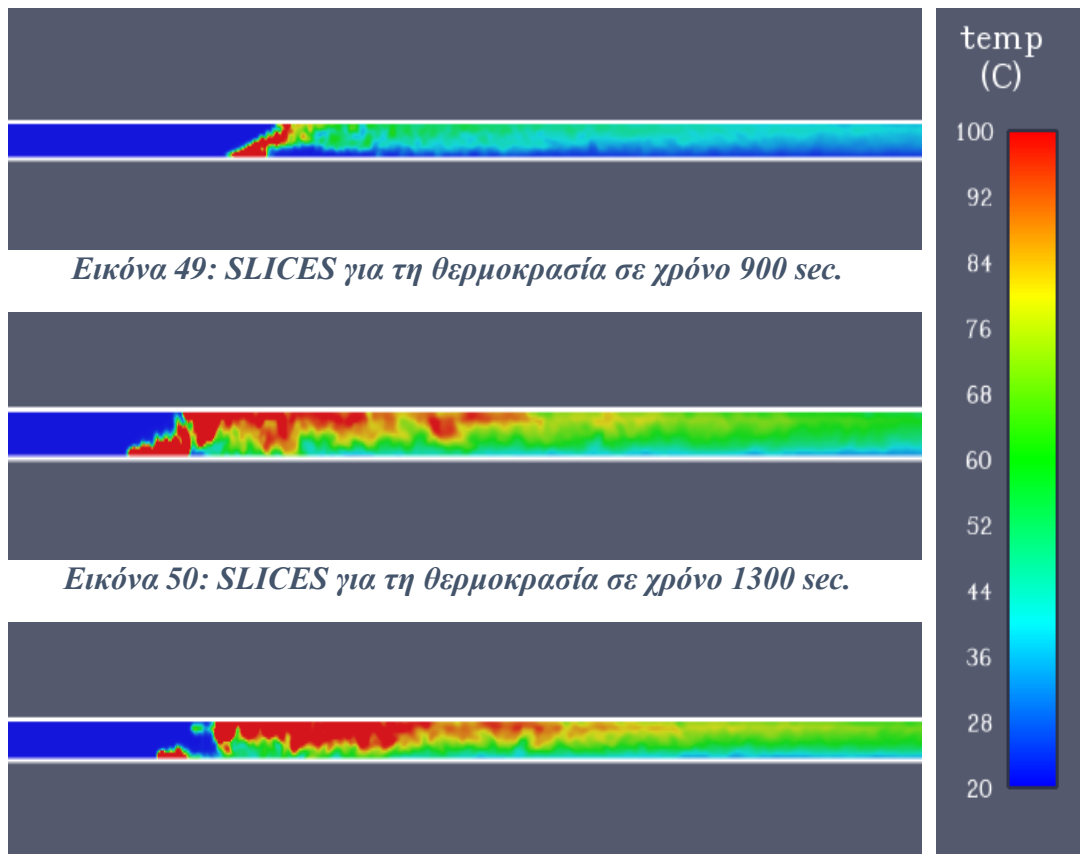


Εικόνα 47:: SLICES για το μονοξείδιο του άνθρακα σε χρόνο 1300 sec

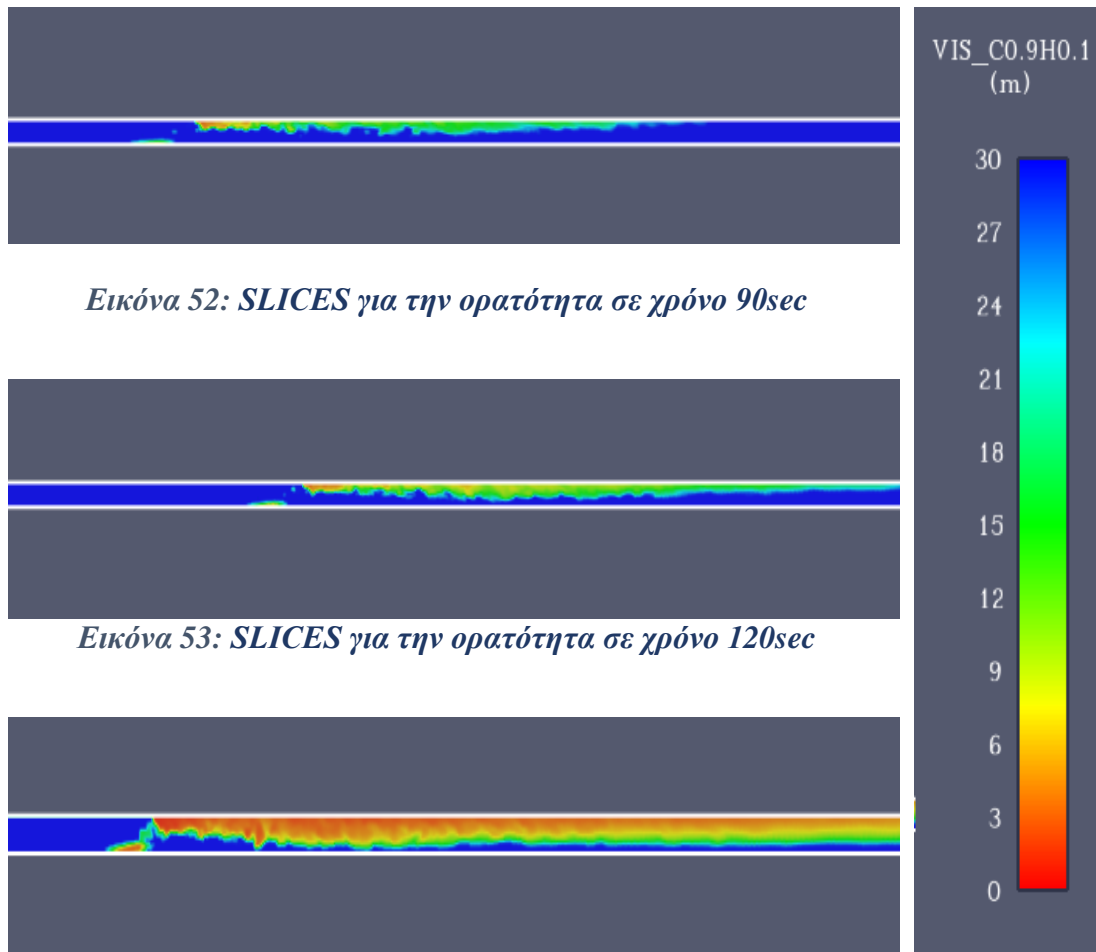


Εικόνα 48:: SLICES για το μονοξείδιο του άνθρακα σε χρόνο 1600 sec

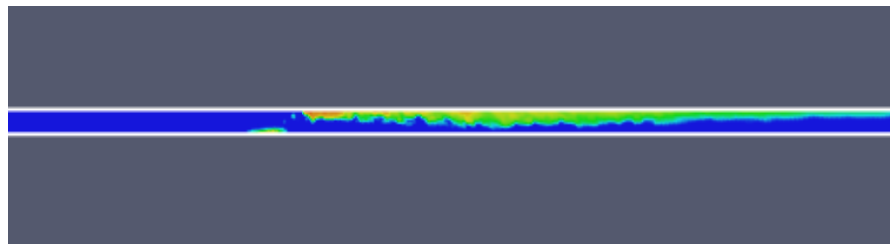
Τα SLICES για την θερμοκρασία παρουσιάζονται στην (Εικόνα 48). Παρατηρείται ότι από 900 sec οι τιμές της θερμοκρασίας αυξάνονται στην οροφή της σήραγγας και στη συνέχεια με το πέρασμα του χρόνου στα 1300 sec εξαπλώνονται σταδιακά και στην όδευση διαφυγής (Εικόνα 49). Ενώ στα 1600 sec με το πέρασμα του χρόνου οι τιμές της θερμοκρασίας είναι πολύ υψηλές στην οροφή και στην όδευση διαφυγής (Εικόνα 50).



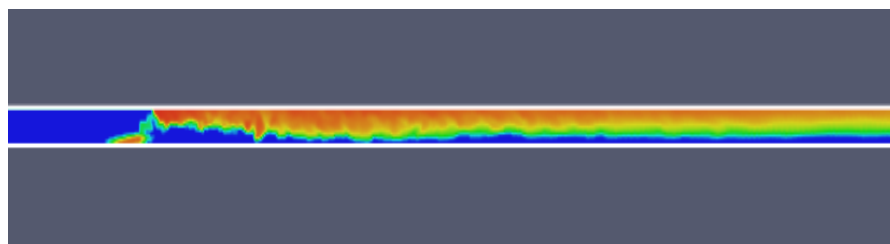
Στην (Εικόνα 51) παρουσιάζονται τα SLICES για την ορατότητα. Παρατηρείται ότι από 90 sec οι τιμές της ορατότητας αυξάνονται στην οροφή της σήραγγας και στη συνέχεια με το πέρασμα του χρόνου στα 120 sec εξαπλώνονται σταδιακά και στην όδευση διαφυγής (Εικόνα 52). Ενώ στα 280 sec με το πέρασμα του χρόνου οι τιμές της ορατότητας είναι πολύ υψηλές στην οροφή και στην όδευση διαφυγής (Εικόνα 53).



Εικόνα 52: SLICES για την ορατότητα σε χρόνο 90sec



Εικόνα 53: SLICES για την ορατότητα σε χρόνο 120sec

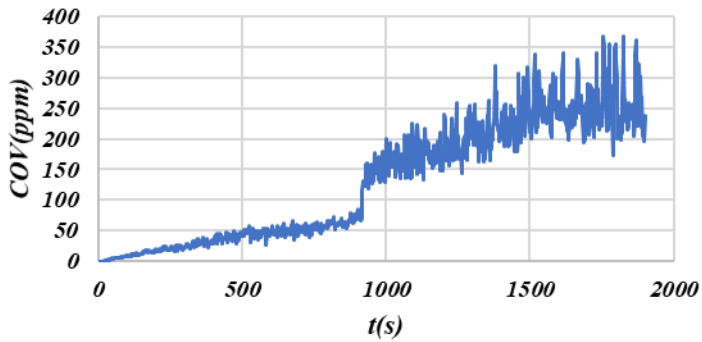


Εικόνα 54: SLICES για την ορατότητα σε χρόνο 280sec

Από τα DEVICES που τοποθετήθηκαν σε διαφορά κρίσιμα σημεία της σήραγγας όπως στην οροφή της σήραγγας και στην όδευση διαφυγής παρουσιάζονται παρακάτω.

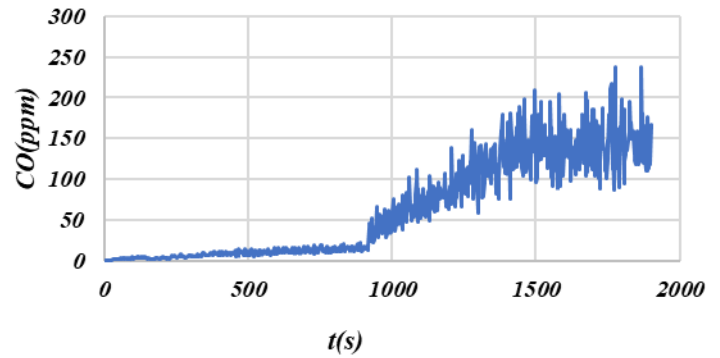
- Σε απόσταση 60 m από την φωτιά παρατηρούνται ότι στα διαγράμματα μονοξειδίου του άνθρακα σε συνάρτηση του χρόνου (Διαγράμματα 126 και 127 αντίστοιχα), οι τιμές COV της οροφής αλλά και το CO της όδευσης διαφυγής αυξάνονται με το πέρασμα του χρόνου. Αντίστοιχα αποτελέσματα λαμβάνονται και από τα διαγράμματα θερμοκρασίας σε συνάρτηση χρόνου (Διαγράμματα 128 και 129 αντίστοιχα). Ποιο συγκεκριμένα στα παραπάνω διαγράμματα παρατηρείται η αύξηση των μελετώμενων τιμών με το πέρασμα του χρόνου. Ενώ στα διαγράμματα της ορατότητας σε συνάρτηση με το χρόνο παρατηρείται η μείωση της ορατότητας με το πέρασμα του χρόνου (Διαγράμματα 130 και 131 αντίστοιχα).

Διάγραμμα COV(ppm)60m-t(s)



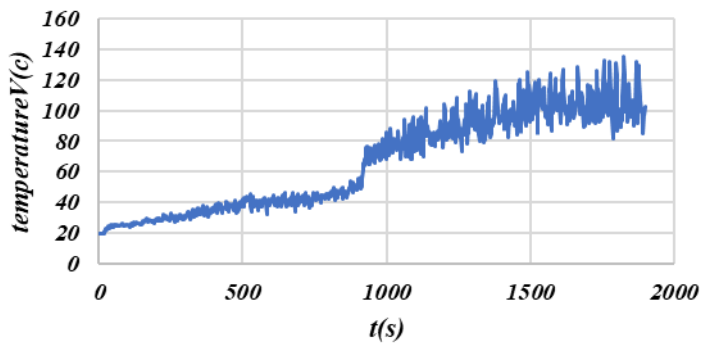
Διάγραμμα 162: Διάγραμμα μονοξείδιο του άνθρακα σε συνάρτηση με το χρόνο, στην οροφή της σήραγγας (απόσταση 60m).

Διάγραμμα CO(ppm)60m-t(s)



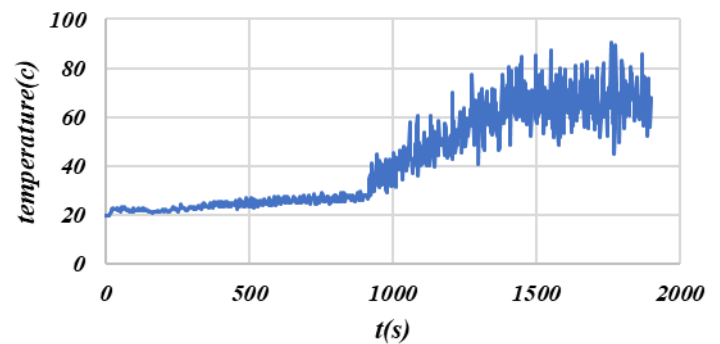
Διάγραμμα 163: Διάγραμμα μονοξείδιο του άνθρακα σε συνάρτηση με το χρόνο, στην όδευση διαφυγής της σήραγγας (απόσταση 60m).

Διάγραμμα temperatureV(c)60m-t(s)



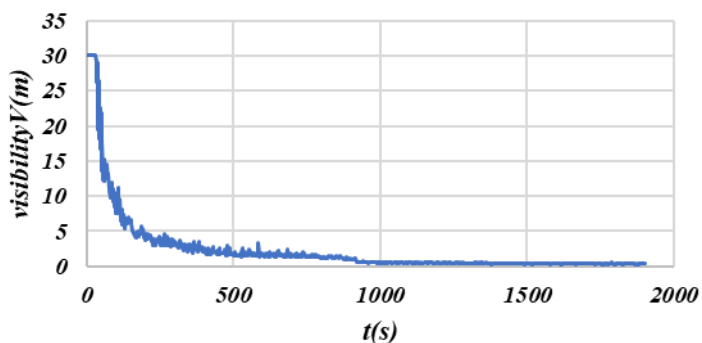
Διάγραμμα 164: Διάγραμμα θερμοκρασίας σε συνάρτηση με το χρόνο, στην οροφή της σήραγγας (απόσταση 60m).

Διάγραμμα temperature(c)60m-t(s)



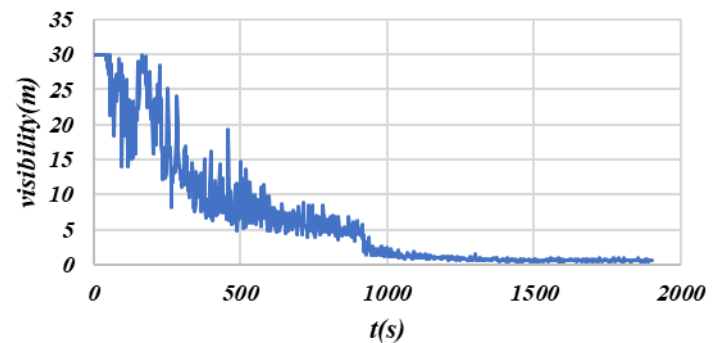
Διάγραμμα 165: Διάγραμμα θερμοκρασίας σε συνάρτηση με το χρόνο, στην όδευση διαφυγής της σήραγγας (απόσταση 60m).

Διάγραμμα visibilityV(m)60m-t(s)



Διάγραμμα 166: Διάγραμμα ορατότητας σε συνάρτηση με το χρόνο, στην οροφή της σήραγγας (απόσταση 60m).

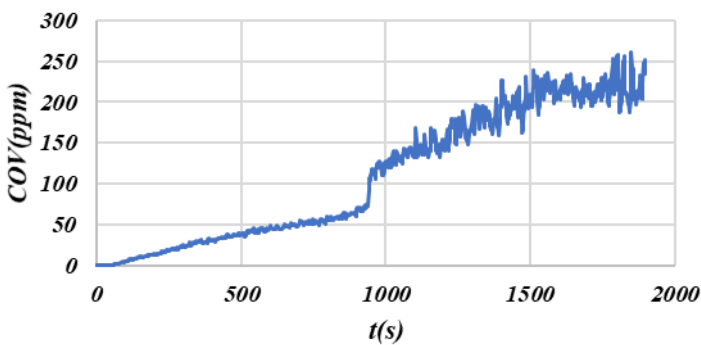
Διάγραμμα visibility(m)60m-t(s)



Διάγραμμα 167: Διάγραμμα ορατότητας σε συνάρτηση με το χρόνο, στην όδευση διαφυγής της σήραγγας (απόσταση 60m).

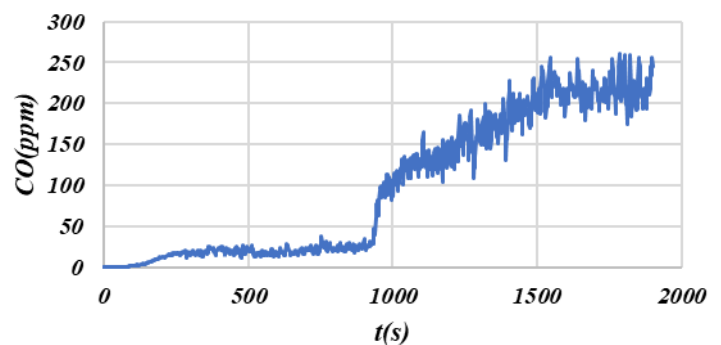
- Σε απόσταση 180 m από την φωτιά παρατηρούνται ότι στα διαγράμματα μονοξειδίου του άνθρακα σε συνάρτησι του χρόνου (Διαγράμματα 132 και 133 αντίστοιχα), οι τιμές COV της οροφής αλλά και το CO της όδευσης διαφυγής αυξάνονται με το πέρασμα του χρόνου. Αντίστοιχα αποτελέσματα λαμβάνονται και από τα διαγράμματα θερμοκρασίας σε συνάρτηση χρόνου (Διαγράμματα 134 και 135 αντίστοιχα). Ποιο συγκεκριμένα στα παραπάνω διαγράμματα παρατηρείται η αύξηση των μελετώμενων τιμών με το πέρασμα του χρόνου. Ενώ στα διαγράμματα της ορατότητας σε συνάρτηση με το χρόνο παρατηρείται η μείωση της ορατότητας με το πέρασμα του χρόνου (Διαγράμματα 136 και 137 αντίστοιχα).

Διάγραμμα COV(ppm)180m-t(s)



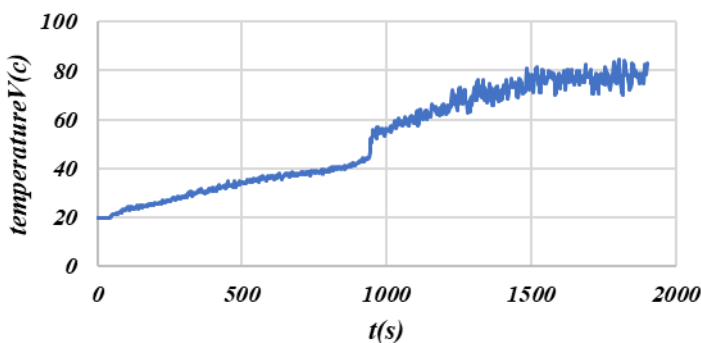
Διάγραμμα 168: Διάγραμμα μονοξειδίου του άνθρακα σε συνάρτηση με το χρόνο, στην οροφή της σήραγγας (απόσταση 180m).

Διάγραμμα CO(ppm)180m-t(s)



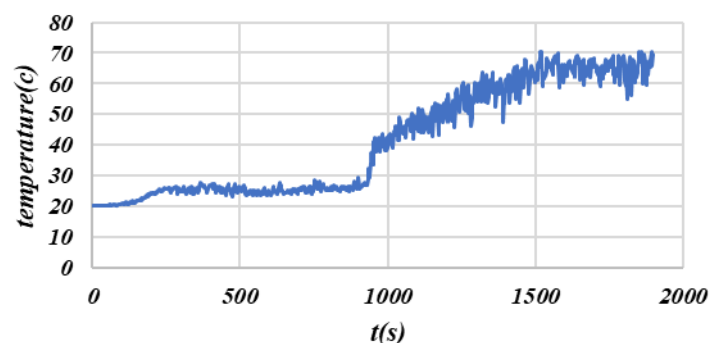
Διάγραμμα 169: Διάγραμμα μονοξειδίου του άνθρακα σε συνάρτηση με το χρόνο, στην όδευση διαφυγής της σήραγγας (απόσταση 180m).

Διάγραμμα temperatureV(c)180m-t(s)

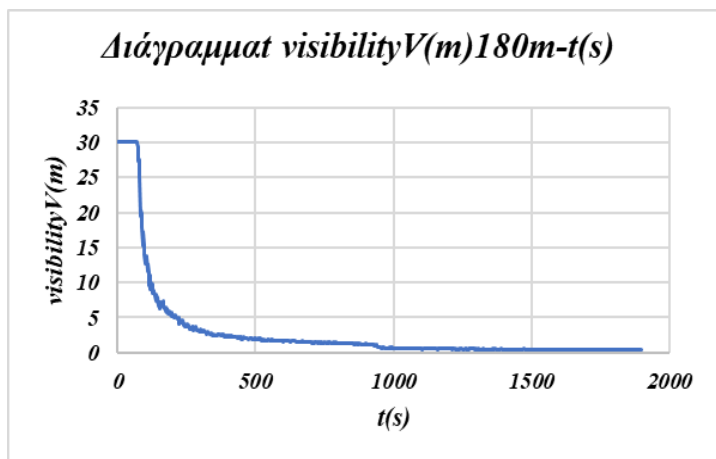


Διάγραμμα 170: Διάγραμμα θερμοκρασίας σε συνάρτηση με το χρόνο, στην οροφή της σήραγγας (απόσταση 180m).

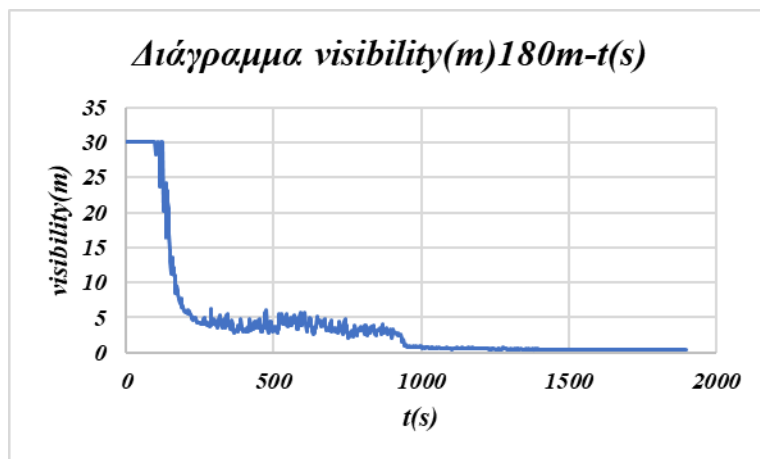
Διάγραμμα temperature(c)180m-t(s)



Διάγραμμα 171: Διάγραμμα θερμοκρασίας σε συνάρτηση με το χρόνο, στην όδευση διαφυγής της σήραγγας (απόσταση 180m).

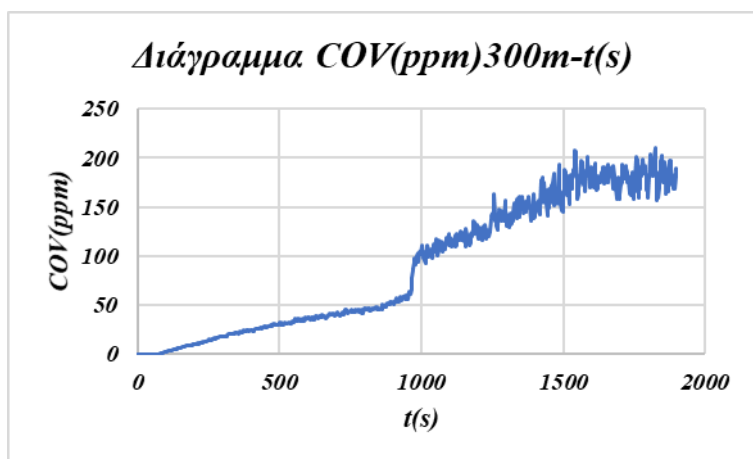


Διάγραμμα 172: Διάγραμμα ορατότητας σε συνάρτηση με το χρόνο, στην οροφή της σήραγγας (απόσταση 180m).

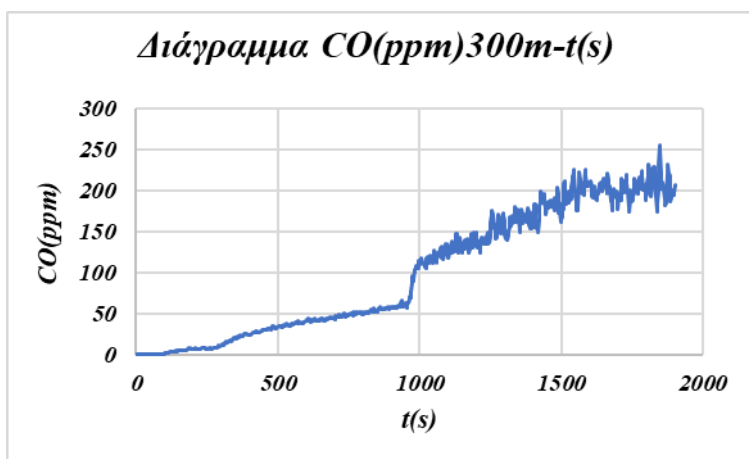


Διάγραμμα 173: Διάγραμμα ορατότητας σε συνάρτηση με το χρόνο, στην όδευση διαφυγής της σήραγγας (απόσταση 180m).

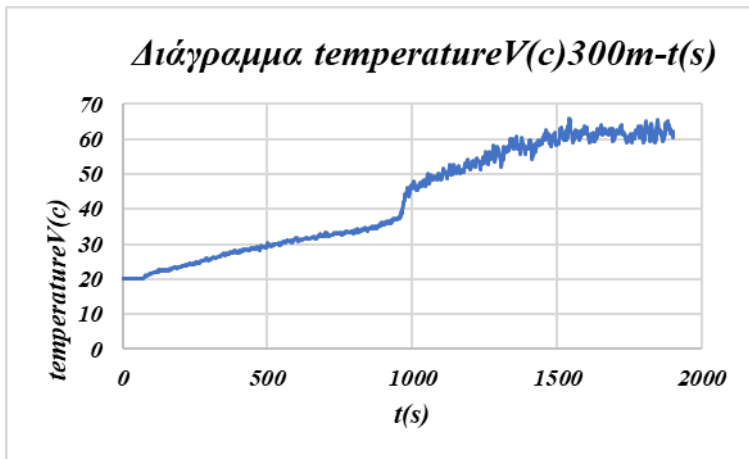
- Σε απόσταση 300 m από την φωτιά παρατηρούνται ότι στα διαγράμματα μονοξειδίου του άνθρακα σε συνάρτηση του χρόνου (Διαγράμματα 138 και 139 αντίστοιχα), οι τιμές COV της οροφής αλλά και το CO της όδευσης διαφυγής αυξάνονται με το πέρασμα του χρόνου. Αντίστοιχα αποτελέσματα λαμβάνονται και από τα διαγράμματα θερμοκρασίας σε συνάρτηση χρόνου (Διαγράμματα 140 και 141 αντίστοιχα). Ποιο συγκεκριμένα στα παραπάνω διαγράμματα παρατηρείται η αύξηση των μελετώμενων τιμών με το πέρασμα του χρόνου. Ενώ στα διαγράμματα της ορατότητας σε συνάρτηση με το χρόνο παρατηρείται η μείωση της ορατότητας με το πέρασμα του χρόνου (Διαγράμματα 142 και 143 αντίστοιχα).



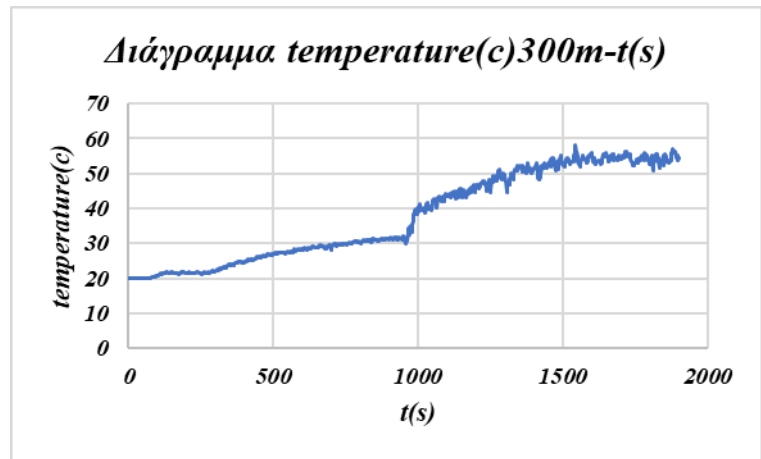
Διάγραμμα 174: Διάγραμμα μονοξειδίου του άνθρακα σε συνάρτηση με το χρόνο, στην οροφή της σήραγγας (απόσταση 300m).



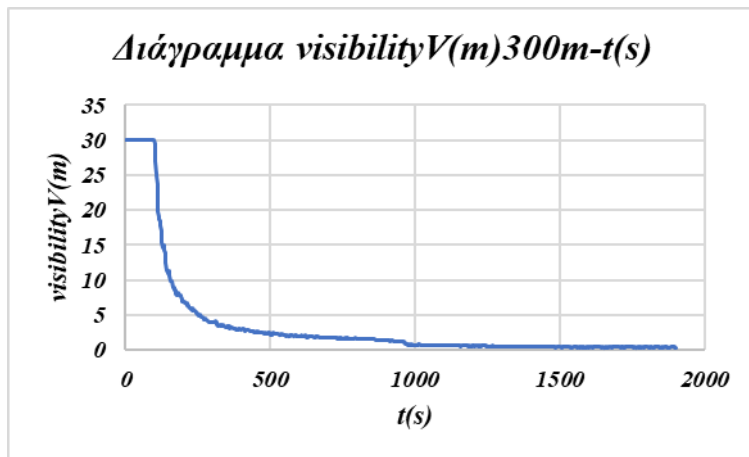
Διάγραμμα 175: Διάγραμμα μονοξειδίου του άνθρακα σε συνάρτηση με το χρόνο, στην όδευση διαφυγής της σήραγγας (απόσταση 300m).



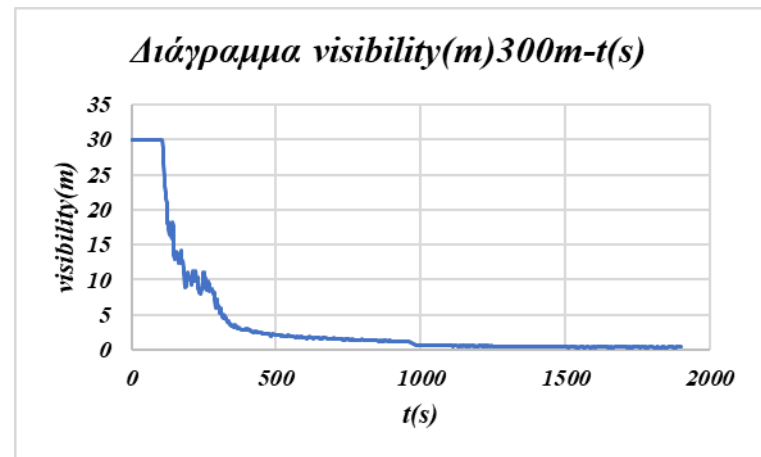
Διάγραμμα 176: Διάγραμμα θερμοκρασίας σε συνάρτηση με το χρόνο, στην οροφή της σήραγγας (απόσταση 300m).



Διάγραμμα 177: Διάγραμμα θερμοκρασίας σε συνάρτηση με το χρόνο, στην όδευση διαφυγής της σήραγγας (απόσταση 300m).



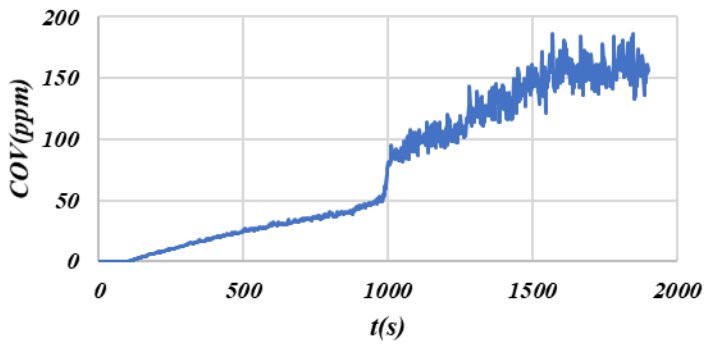
Διάγραμμα 178: Διάγραμμα ορατότητας σε συνάρτηση με το χρόνο, στην οροφή της σήραγγας (απόσταση 300m).



Διάγραμμα 179: Διάγραμμα ορατότητας σε συνάρτηση με το χρόνο, στην όδευση διαφυγής της σήραγγας (απόσταση 300m).

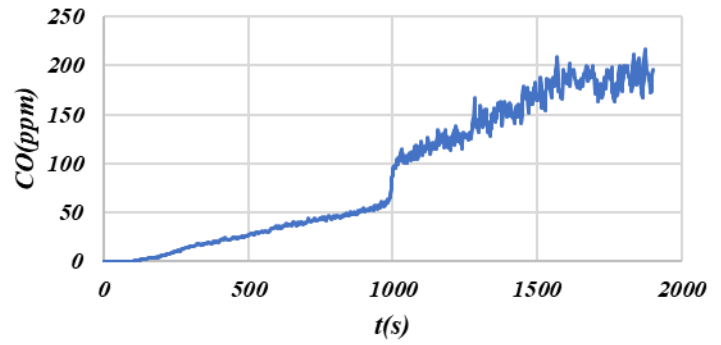
- Σε απόσταση 420 m από την φωτιά παρατηρούνται ότι στα διαγράμματα μονοξειδίου του άνθρακα σε συνάρτηση του χρόνου (Διαγράμματα 144 και 145 αντίστοιχα), οι τιμές COV της οροφής αλλά και το CO της όδευσης διαφυγής αυξάνονται με το πέρασμα του χρόνου. Αντίστοιχα αποτελέσματα λαμβάνονται και από τα διαγράμματα θερμοκρασίας σε συνάρτηση χρόνου (Διαγράμματα 146 και 147 αντίστοιχα). Ποιο συγκεκριμένα στα παραπάνω διαγράμματα παρατηρείται η αύξηση των μελετώμενων τιμών με το πέρασμα του χρόνου. Ενώ στα διαγράμματα της ορατότητας σε συνάρτηση με το χρόνο παρατηρείται η μείωση της ορατότητας με το πέρασμα του χρόνου (Διαγράμματα 148 και 149 αντίστοιχα).

Διάγραμμα COV(ppm)420m-t(s)



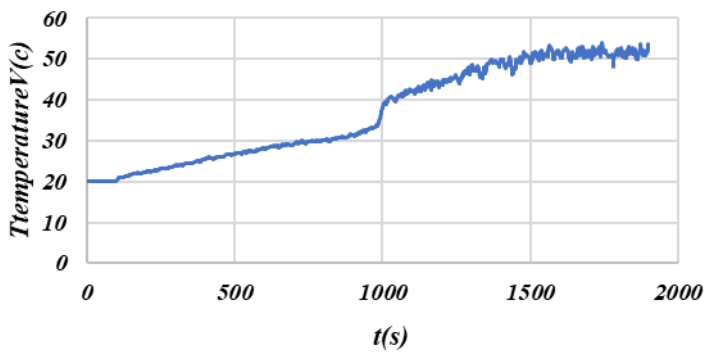
Διάγραμμα 180: Διάγραμμα μονοξείδιο του άνθρακα σε συνάρτηση με το χρόνο, στην οροφή της σήραγγας (απόσταση 420m).

Διάγραμμα CO(ppm)420m-t(s)



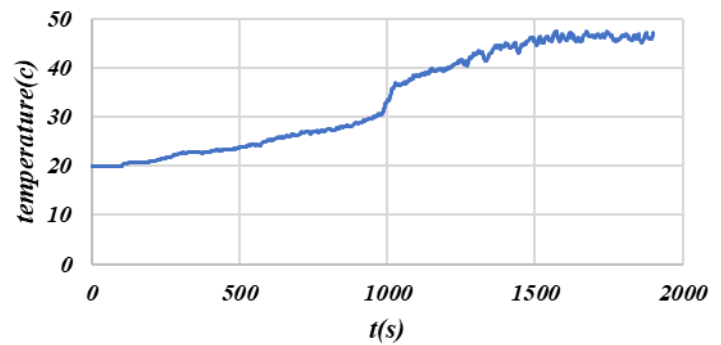
Διάγραμμα 181: Διάγραμμα μονοξείδιο του άνθρακα σε συνάρτηση με το χρόνο, στην όδευση διαφυγής της σήραγγας (απόσταση 420m).

Διάγραμμα temperatureV(c)420m-t(s)



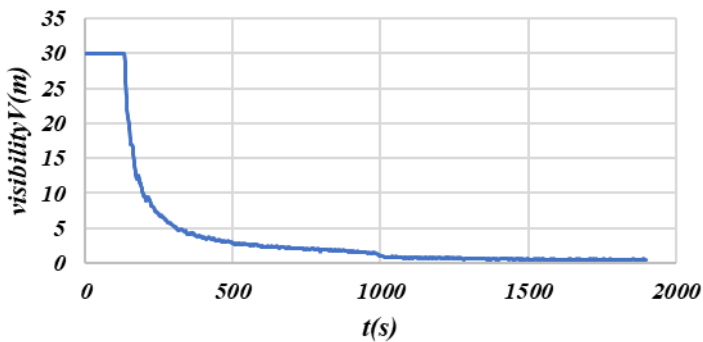
Διάγραμμα 182: Διάγραμμα θερμοκρασίας σε συνάρτηση με το χρόνο, στην οροφή της σήραγγας (απόσταση 420m).

Διάγραμμα temperature(c)420m-t(s)



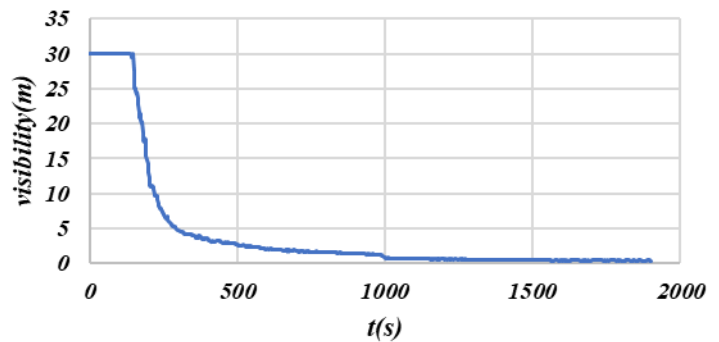
Διάγραμμα 183: Διάγραμμα θερμοκρασίας σε συνάρτηση με το χρόνο, στην όδευση διαφυγής της σήραγγας (απόσταση 420m).

Διάγραμμα visibilityV(m)420m-t(s)



Διάγραμμα 184: Διάγραμμα ορατότητας σε συνάρτηση με το χρόνο, στην οροφή της σήραγγας (απόσταση 420m).

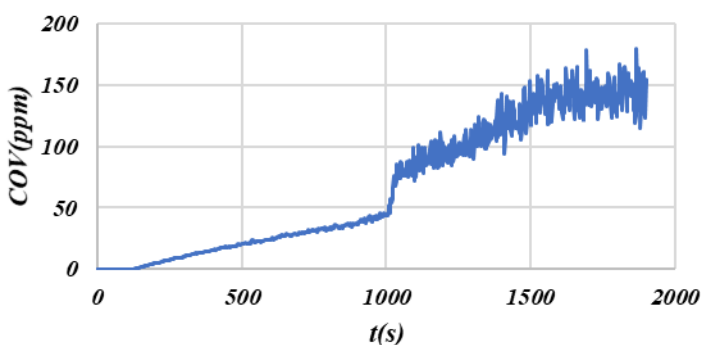
Διάγραμμα visibility(m)420m-t(s)



Διάγραμμα 185: Διάγραμμα ορατότητας σε συνάρτηση με το χρόνο, στην όδευση διαφυγής της σήραγγας (απόσταση 420m).

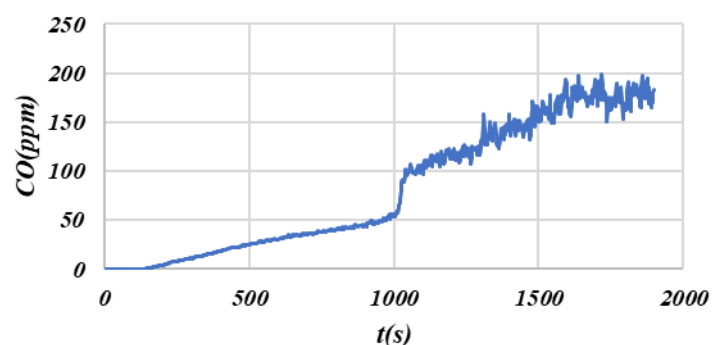
- Σε απόσταση 540 m από την φωτιά παρατηρούνται ότι στα διαγράμματα μονοξειδίου του άνθρακα σε συνάρτηση του χρόνου (Διαγράμματα 150 και 151 αντίστοιχα), οι τιμές COV της οροφής αλλά και το CO της όδευσης διαφυγής αυξάνονται με το πέρασμα του χρόνου. Αντίστοιχα αποτελέσματα λαμβάνονται και από τα διαγράμματα θερμοκρασίας σε συνάρτηση χρόνου (Διαγράμματα 152 και 153 αντίστοιχα). Ποιο συγκεκριμένα στα παραπάνω διαγράμματα παρατηρείται η αύξηση των μελετώμενων τιμών με το πέρασμα του χρόνου. Ενώ στα διαγράμματα της ορατότητας σε συνάρτηση με το χρόνο παρατηρείται η μείωση της ορατότητας με το πέρασμα του χρόνου (Διαγράμματα 154 και 155 αντίστοιχα).

Διάγραμμα COV(ppm)540m-t(s)



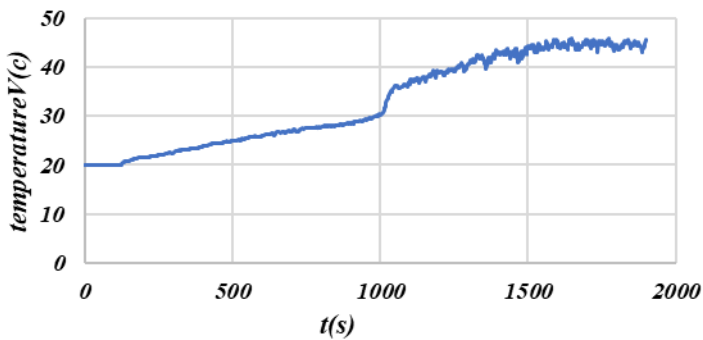
Διάγραμμα 186: Διάγραμμα μονοξειδίου του άνθρακα σε συνάρτηση με το χρόνο, στην οροφή της σήραγγας (απόσταση 540m).

Διάγραμμα CO(ppm)540m-t(s)

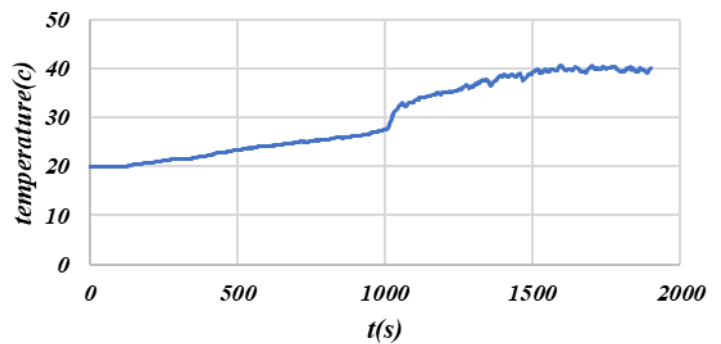


Διάγραμμα 187: Διάγραμμα μονοξειδίου του άνθρακα σε συνάρτηση με το χρόνο, στην όδευση διαφυγής της σήραγγας (απόσταση 540m).

Διάγραμμα temperatureV(c)540m-t(s)



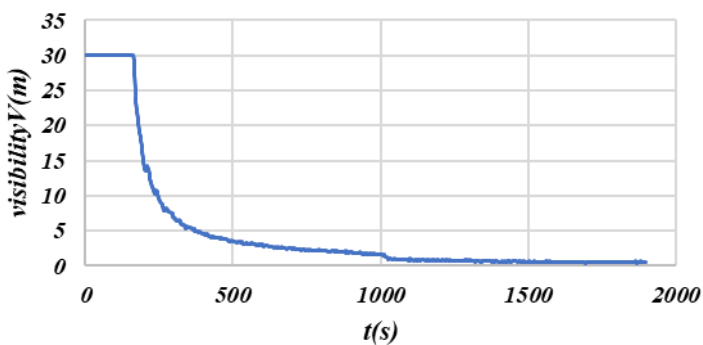
Διάγραμμα temperature(c)540m-t(s)



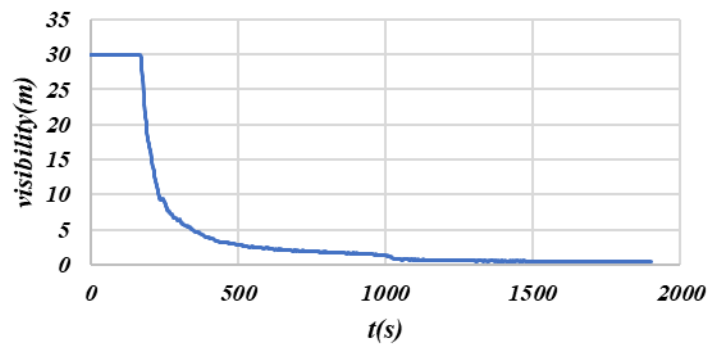
Διάγραμμα 188: Διάγραμμα θερμοκρασίας σε συνάρτηση με το χρόνο, στην οροφή της σήραγγας (απόσταση 540m).

Διάγραμμα 189: Διάγραμμα θερμοκρασίας σε συνάρτηση με το χρόνο, στην όδευση διαφυγής της σήραγγας (απόσταση 540m).

Διάγραμμα visibilityV(m)540m-t(s)



Διάγραμμα visibility(m)540m-t(s)



Διάγραμμα 190: Διάγραμμα ορατότητας σε συνάρτηση με το χρόνο, στην οροφή της σήραγγας (απόσταση 540m).

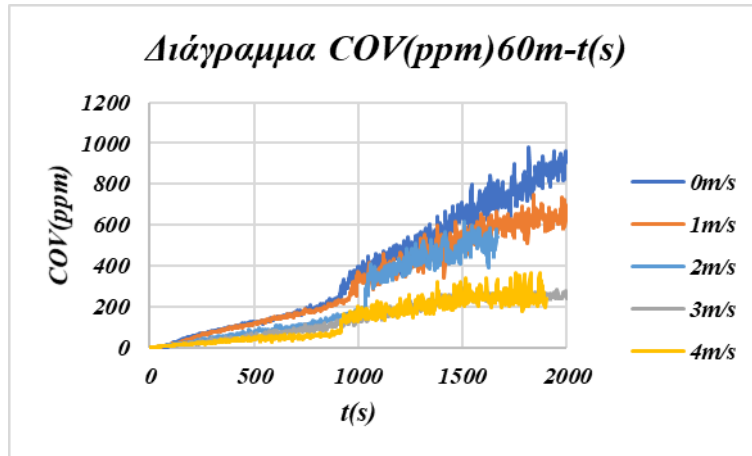
Διάγραμμα 191: Διάγραμμα ορατότητας σε συνάρτηση με το χρόνο, στην όδευση διαφυγής της σήραγγας (απόσταση 540m).

4.3 Αποτελέσματα σεναρίων Pyrosim

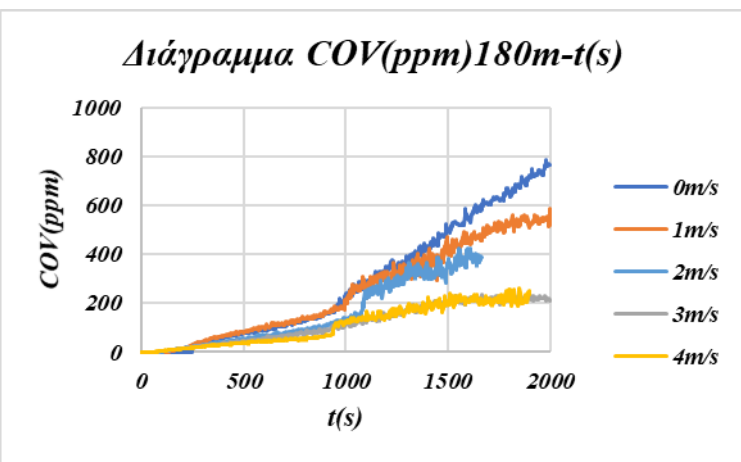
Τα αποτελέσματα που προκύπτουν απ' όλα τα σεσάρια σε σχέση με τις διαφορετικές ταχύτητες αέρα και το μονοξείδιο του άνθρακα είναι τα εξής:

Μονοξείδιο του άνθρακα CO της οροφής της σήραγγας

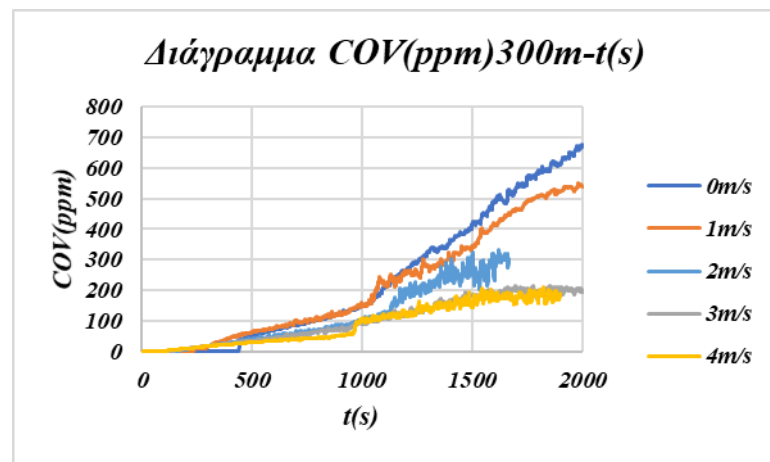
Για το μονοξείδιο του άνθρακα (CO) της οροφής της σήραγγας σε διάφορες αποστάσεις από την φωτιά παρατηρούνται από τα παρακάτω διαγράμματα (Διάγραμμα 156, 157, 158, 159 και 160 αντίστοιχα) ότι με την αύξηση της ταχύτητας του αέρα, μειώνεται η συγκέντρωση του μονοξειδίου του άνθρακα στην οροφή.



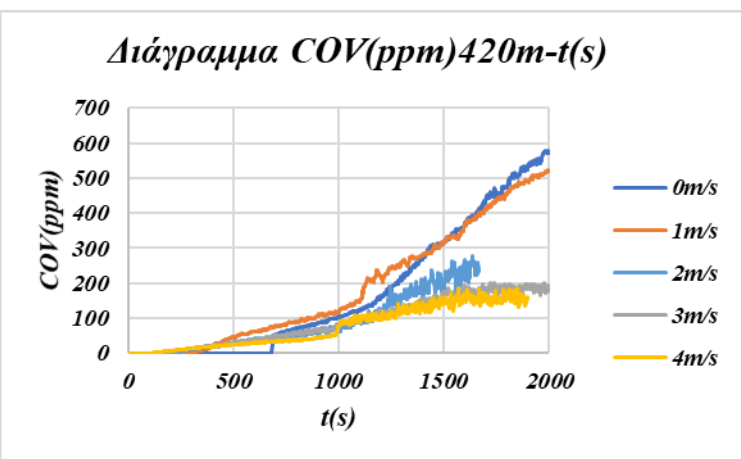
Διάγραμμα 192: Διάγραμμα συσχέτισης ταχυτήτων του αέρα σε συνάρτηση με το μονοξείδιο του άνθρακα κατά το πέρας του χρόνου, στην οροφή της σήραγγας (απόσταση 60m).



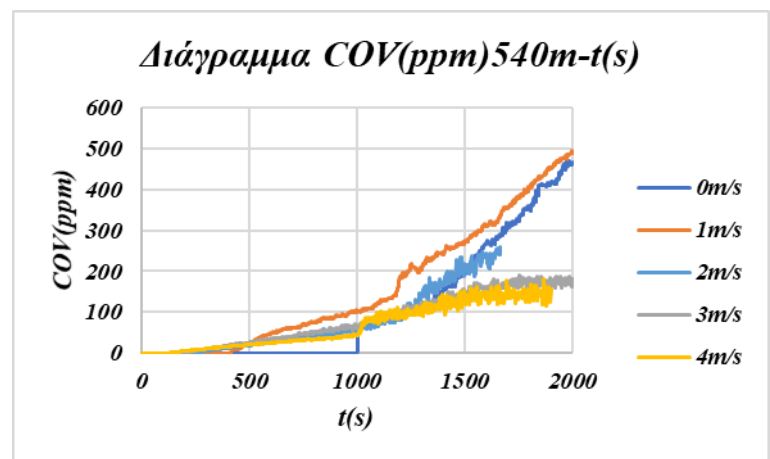
Διάγραμμα 193: Διάγραμμα συσχέτισης ταχυτήτων του αέρα σε συνάρτηση με το μονοξείδιο του άνθρακα κατά το πέρας του χρόνου, στην οροφή της σήραγγας (απόσταση 180 m).



Διάγραμμα 194: Διάγραμμα συσχέτισης ταχυτήτων του αέρα σε συνάρτηση με το μονοξείδιο του άνθρακα κατά το πέρας του χρόνου, στην οροφή της σήραγγας (απόσταση 300 m).



Διάγραμμα 195: Διάγραμμα συσχέτισης ταχυτήτων του αέρα σε συνάρτηση με το μονοξείδιο του άνθρακα κατά το πέρας του χρόνου, στην οροφή της σήραγγας (απόσταση 420 m).



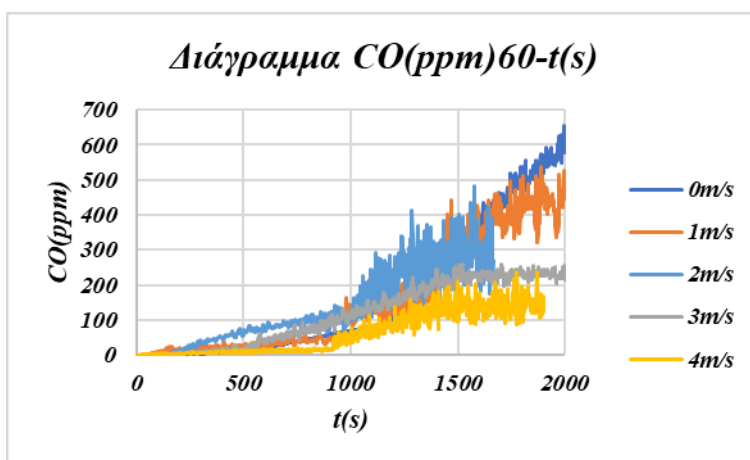
Διάγραμμα 196: Διάγραμμα συσχέτισης ταχυτήτων του αέρα σε συνάρτηση με το μονοξείδιο του άνθρακα κατά το πέρας του χρόνου, στην οροφή της σήραγγας (απόσταση 540 m).

Μονοξείδιο του άνθρακα CO στην όδευση διαφυγής της σήραγγας

Για το μονοξείδιο του άνθρακα (CO) στην όδευση διαφυγής της σήραγγας σε διάφορες αποστάσεις από την φωτιά παρατηρούνται από τα παρακάτω διαγράμματα (Διάγραμμα 161, 162, 163, 164 και 165 αντίστοιχα) ότι με την αύξηση την ταχύτητας του αέρα, μειώνεται η συγκέντρωση του μονοξειδίου του άνθρακα στην όδευση διαφυγής. Συμπεραίνεται ότι η μεγάλη ταχυτήτων του αέρα έχει ως αποτέλεσμα να απομακρύνει τα τοξικά αέρια πιο γρήγορα, δηλαδή να κρατάει πιο χαμηλή τη συγκέντρωση του μονοξειδίου του άνθρακα.

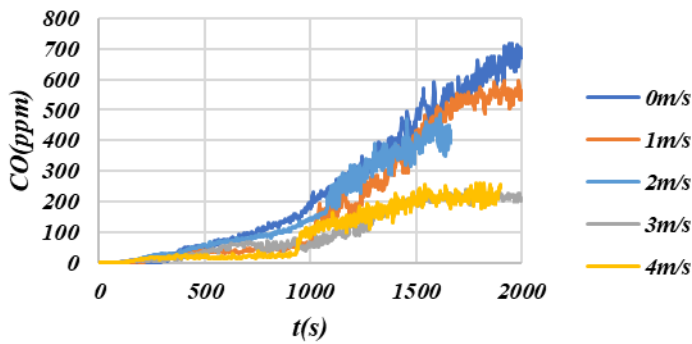
Από τη συσχέτιση των διαγραμμάτων και των βιβλιογραφικών δεδομένων αποφαίνεται ότι η συγκέντρωση του μονοξειδίου του άνθρακα δεν ξεπερνά το κρίσιμο όριο θνησιμότητας (12000 ppm)* και επομένως είναι αποτελεσματική η διαδικασία της εκκένωσης. Παρόλα αυτά παρακάτω γίνεται εκτενέστερη μελέτη μέσω του προγράμματος Pathfinder για την εξακρίβωση και ποσοτικοποίηση των τοξικών αερίων.

*Στην πράξη λαμβάνονται χαμηλότερες τιμές για την ικανότητα του επιβάτη να εκκενώσει μόνος του τον χώρο.



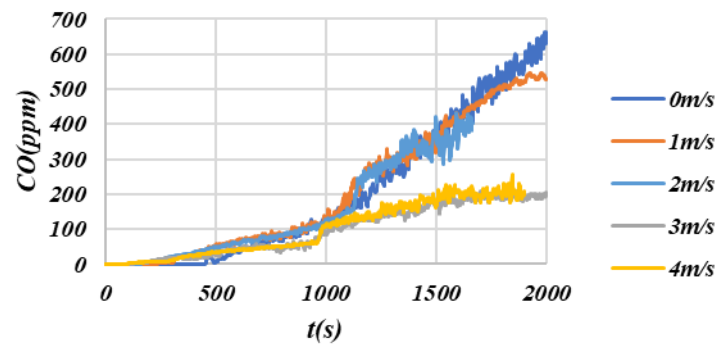
Διάγραμμα 197: Διάγραμμα συσχέτισης ταχυτήτων του αέρα σε συνάρτηση με το μονοξείδιο του άνθρακα κατά το πέρας του χρόνου, στην όδευση διαφυγής της σήραγγας (απόσταση 60m).

Διάγραμμα CO(ppm)180m-t(s)



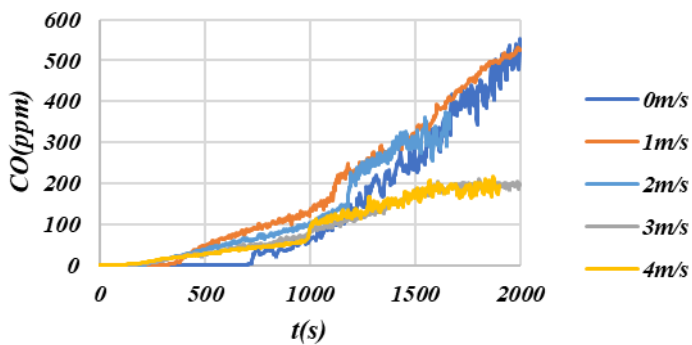
Διάγραμμα 198: Διάγραμμα συσχέτισης ταχυτήτων του αέρα σε συνάρτηση με το μονοξείδιο του άνθρακα κατά το πέρασ του χρόνου, στην όδευση διαφυγής της σήραγγας (απόσταση 180m).

Διάγραμμα CO(ppm)300m-t(s)



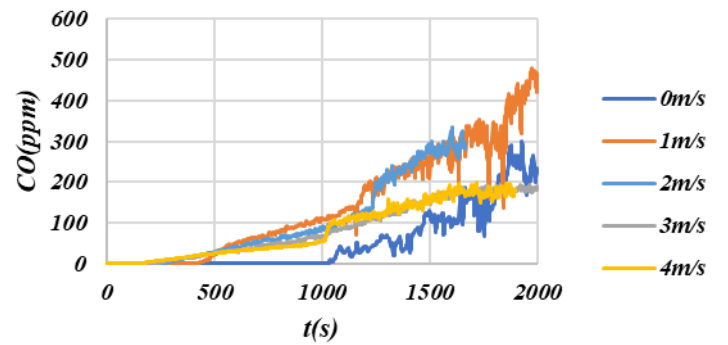
Διάγραμμα 199: Διάγραμμα συσχέτισης ταχυτήτων του αέρα σε συνάρτηση με το μονοξείδιο του άνθρακα κατά το πέρασ του χρόνου, στην όδευση διαφυγής της σήραγγας (απόσταση 300m).

Διάγραμμα CO(ppm)420m-t(s)



Διάγραμμα 200: Διάγραμμα συσχέτισης ταχυτήτων του αέρα σε συνάρτηση με το μονοξείδιο του άνθρακα κατά το πέρασ του χρόνου, στην όδευση διαφυγής της σήραγγας (απόσταση 420m).

Διάγραμμα CO(ppm)540m-t(s)



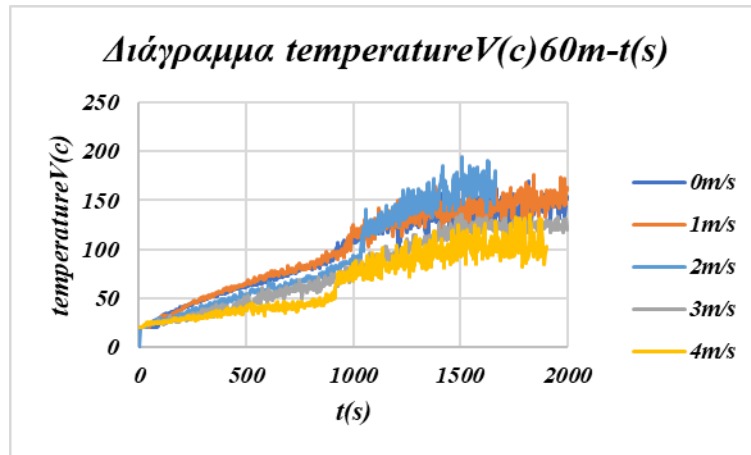
Διάγραμμα 201: Διάγραμμα συσχέτισης ταχυτήτων του αέρα σε συνάρτηση με το μονοξείδιο του άνθρακα κατά το πέρασ του χρόνου, στην όδευση διαφυγής της σήραγγας (απόσταση 540m).

Τα αποτελέσματα που προκύπτουν απ' όλα τα σενάρια σε σχέση με τις διαφορετικές ταχύτητες του αέρα και τη θερμοκρασία είναι τα εξής:

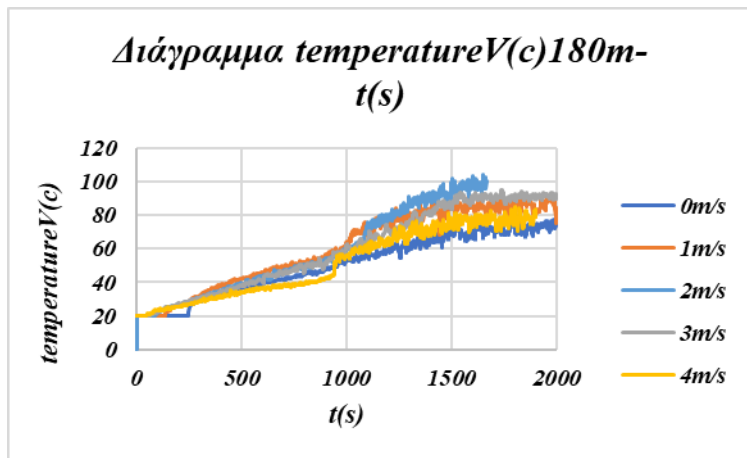
Θερμοκρασία της οροφής της σήραγγας

Για τη θερμοκρασία της οροφής της σήραγγας σε διάφορες αποστάσεις από τη φωτιά παρατηρείται από τα παρακάτω διαγράμματα (Διάγραμμα 167, 168, 169 και 170 αντίστοιχα) ότι με την αύξηση την ταχύτητας του αέρα, αυξάνεται η θερμοκρασία. Επίσης στα 60 m (Διάγραμμα 166 αντίστοιχα) με 0 m/s ταχύτητα του αέρα είναι υψηλότερη η θερμοκρασία γιατί η ταχύτητα του αέρα σπρώχνει το θερμό καπνό προς την έξοδο της σήραγγας και παρατηρείται αύξηση κατά μήκος της σήραγγας στη θερμοκρασία όσο αυξάνεται ο αερισμός. Στη περίπτωση που η ταχύτητα ξεπεράσει τα

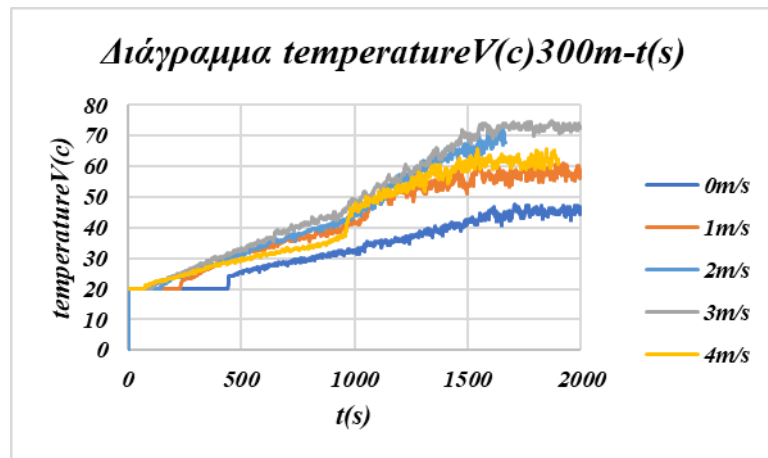
3,5 m/s to critical velocity παρατηρούμε ότι αρχίζει να πέφτει πάλι λίγο η θερμοκρασία (χειρότερο σενάριο 3 m/s).



Διάγραμμα 202: Διάγραμμα συσχέτισης ταχυτήτων του αέρα σε συνάρτηση με την θερμοκρασίας κατά το πέρασ του χρόνου, στην οροφή της σήραγγας (απόσταση 60m).

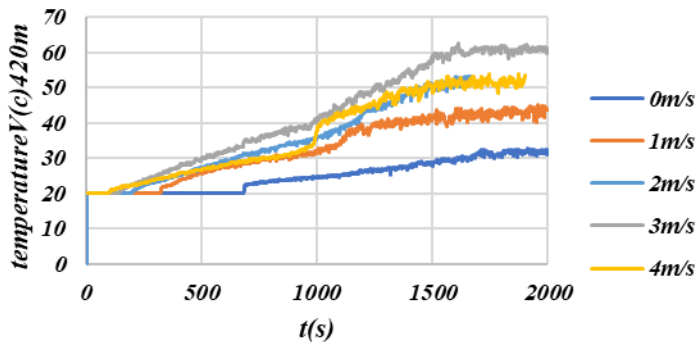


Διάγραμμα 203: Διάγραμμα συσχέτισης ταχυτήτων του αέρα σε συνάρτηση με την θερμοκρασίας κατά το πέρασ του χρόνου, στην οροφή της σήραγγας (απόσταση 180m).

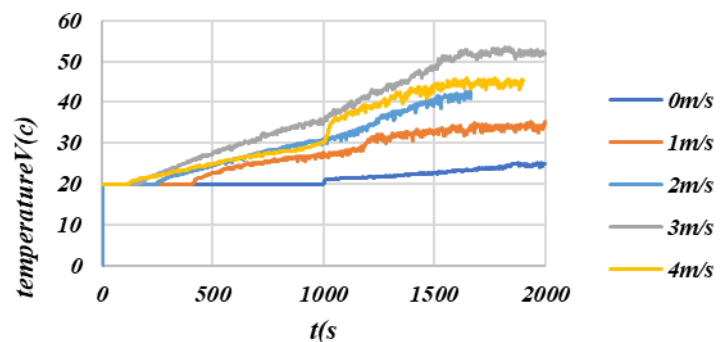


Διάγραμμα 204: Διάγραμμα συσχέτισης ταχυτήτων του αέρα σε συνάρτηση με την θερμοκρασίας κατά το πέρασ του χρόνου, στην οροφή της σήραγγας (απόσταση 300m).

Διάγραμμα temperatureV(c)420m-t(s)



Διάγραμμα temperatureV(c)540m-t(s)



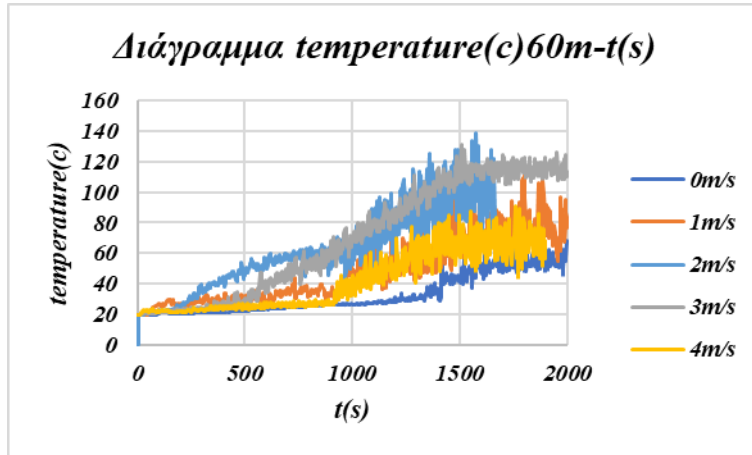
Διάγραμμα 205: Διάγραμμα συσχέτισης ταχυτήτων του αέρα σε συνάρτηση με την θερμοκρασίας κατά το πέρασ του χρόνου, στην οροφή της σήραγγας (απόσταση 420m).

Διάγραμμα 206: Διάγραμμα συσχέτισης ταχυτήτων του αέρα σε συνάρτηση με την θερμοκρασίας κατά το πέρασ του χρόνου, στην οροφή της σήραγγας (απόσταση 540m).

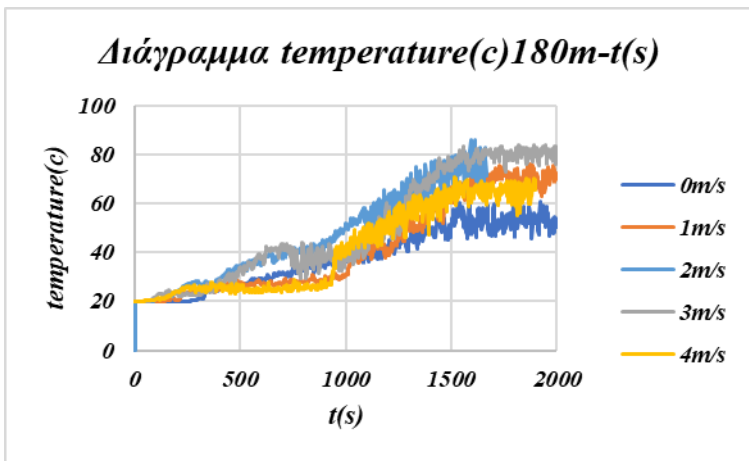
Θερμοκρασία στην όδευση διαφυγής της σήραγγας

Για τη θερμοκρασία στην όδευση διαφυγής της σήραγγας σε διάφορες αποστάσεις από την φωτιά παρατηρείται από τα παρακάτω διαγράμματα (Διάγραμμα 171, 172, 173, 174 και 175 αντίστοιχα) ότι με την αύξηση την ταχύτητας του αέρα, αυξάνεται η θερμοκρασία κατά μήκος της σήραγγας.

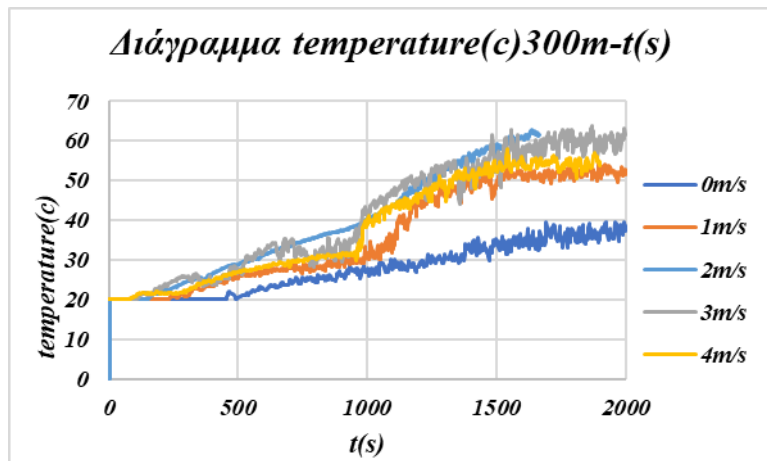
Η αύξηση θερμοκρασίας δεν φτάνει σε επίπεδα που μπορεί να επηρεάσει άμεσα των άνθρωπο αλλά λειτουργεί αθροιστικά ενοχλώντας τον άνθρωπό κατά την διάρκεια της εκκένωση. Όμως, η θερμοκρασία είναι κάτω από 120° C. Σύμφωνα με τα βιβλιογραφικά δεδομένα, η ακαριαία θνησιμότητα θερμοκρασίας είναι μέχρι 120° C. Εάν η θερμοκρασία αυτή ξεπεραστεί και οι επιβάτες έρθουν αντιμέτωποι με τις συγκεκριμένες συνθήκες, είναι αδύνατη η επιβίωσή τους.



Διάγραμμα 207: Διάγραμμα συσχέτισης ταχυτήτων του αέρα σε συνάρτηση με την θερμοκρασίας κατά το πέρας του χρόνου, στην όδευση διαφυγής της σήραγγας (απόσταση 60m).

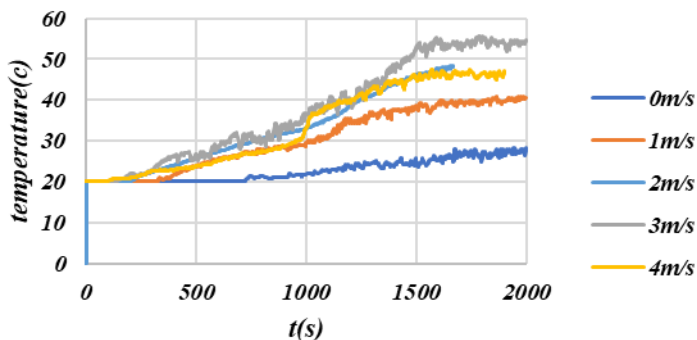


Διάγραμμα 208: Διάγραμμα συσχέτισης ταχυτήτων του αέρα σε συνάρτηση με την θερμοκρασίας κατά το πέρας του χρόνου, στην όδευση διαφυγής της σήραγγας (απόσταση 180m).

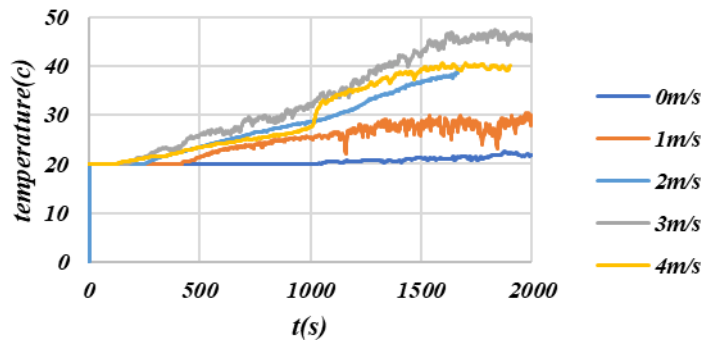


Διάγραμμα 209: Διάγραμμα συσχέτισης ταχυτήτων του αέρα σε συνάρτηση με την θερμοκρασίας κατά το πέρας του χρόνου, στην όδευση διαφυγής της σήραγγας (απόσταση 300m).

Διάγραμμα temperature(c)420m-t(s)



Διάγραμμα temperature(c)540m-t(s)



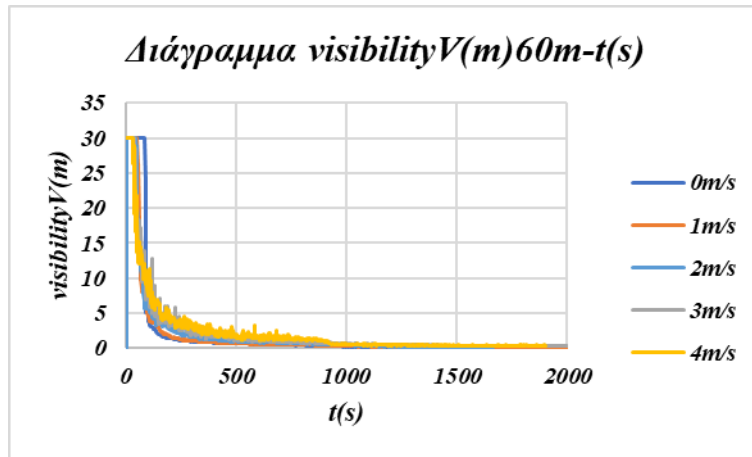
Διάγραμμα 210: Διάγραμμα συσχέτισης ταχυτήτων του αέρα σε συνάρτηση με την θερμοκρασίας κατά το πέρασ του χρόνου, στην όδευση διαφυγής της σήραγγας (απόσταση 420m).

Διάγραμμα 211: Διάγραμμα συσχέτισης ταχυτήτων του αέρα σε συνάρτηση με την θερμοκρασίας κατά το πέρασ του χρόνου, στην όδευση διαφυγής της σήραγγας (απόσταση 540m).

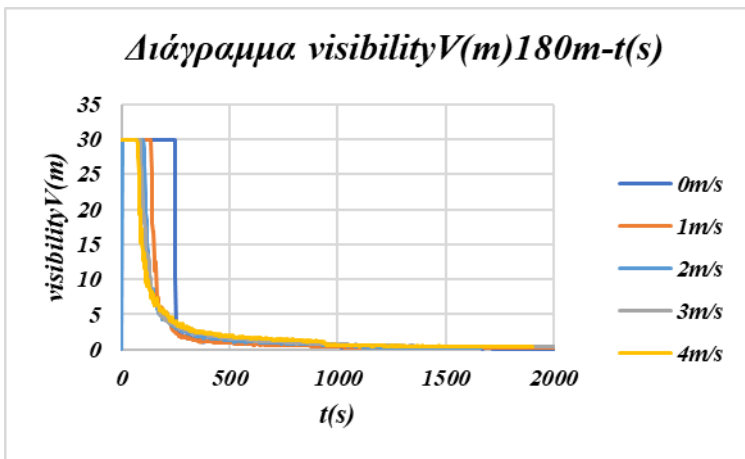
Τα αποτελέσματα που προκύπτουν απ' όλα τα σενάρια σε σχέση με τις διάφορες ταχύτητες αερισμού και την ορατότητα είναι τα εξής:

Ορατότητα της οροφής της σήραγγας

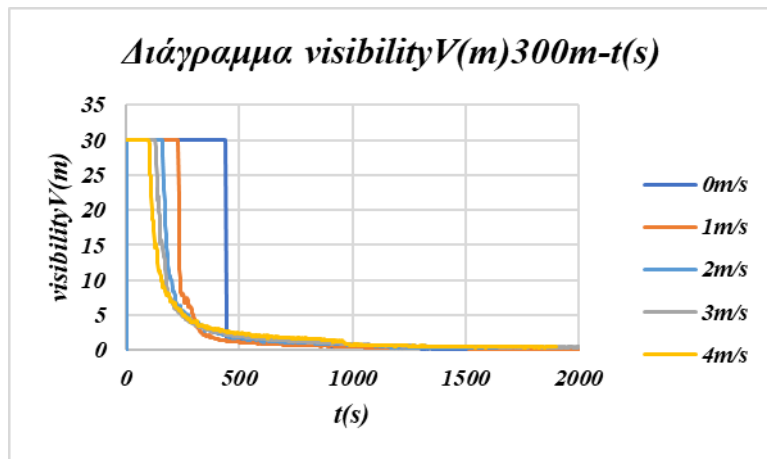
Η ορατότητα της οροφής της σήραγγας σε διάφορες αποστάσεις από τη φωτιά παρατηρείται από τα παρακάτω διαγράμματα (Διάγραμμα 176, 178, 179 και 180 αντίστοιχα) ότι η αύξηση της ταχύτητας του αέρα επισπεύδει τη διασπορά του καπνού, με αποτέλεσμα τη μείωση της ορατότητας σε μικρότερο χρονικό διάστημα. Πιο συγκεκριμένα σε όλες της περιπτώσεις πέφτει η ορατότητα κάτω από 2 m/s αλλά στην περίπτωση που δεν έχουμε αέρα 0 m/s είναι αναμενόμενο να καθυστερήσει κατά μήκος της σήραγγας να μειωθεί η ορατότητα.



Διάγραμμα 212: Διάγραμμα συσχέτισης ταχυτήτων του αέρα σε συνάρτηση με την ορατότητα κατά το πέρασ του χρόνου, στην οροφή της σήραγγας (απόσταση 60m).

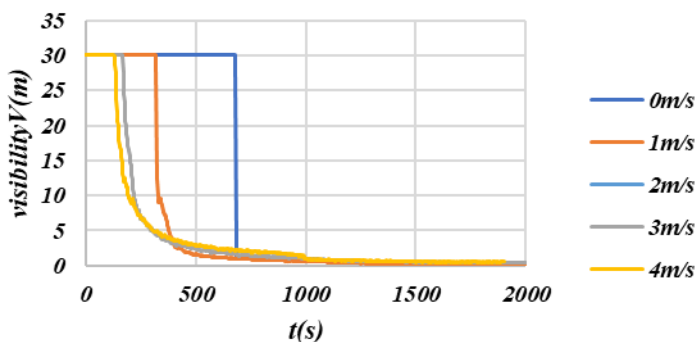


Διάγραμμα 213: Διάγραμμα συσχέτισης ταχυτήτων του αέρα σε συνάρτηση με την ορατότητα κατά το πέρασ του χρόνου, στην οροφή της σήραγγας (απόσταση 180m).



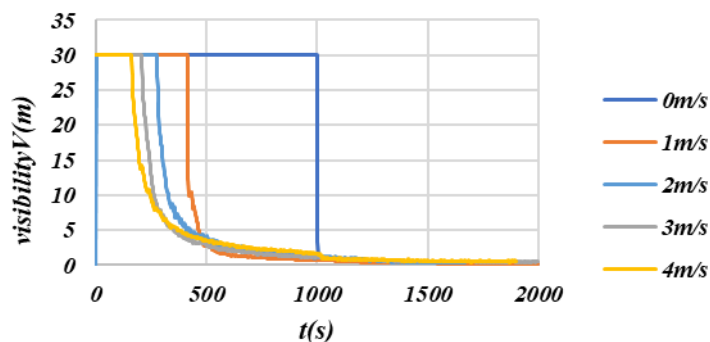
Διάγραμμα 214: Διάγραμμα συσχέτισης ταχυτήτων του αέρα σε συνάρτηση με την ορατότητα κατά το πέρασ του χρόνου, στην οροφή της σήραγγας (απόσταση 300m).

Διάγραμμα visibilityV(m)420m-t(s)



Διάγραμμα 215: Διάγραμμα συσχέτισης ταχυτήτων του αέρα σε συνάρτηση με την ορατότητα κατά το πέρασ του χρόνου, στην οροφή της σήραγγας (απόσταση 420m).

Διάγραμμα visibilityV(m)540m-t(s)

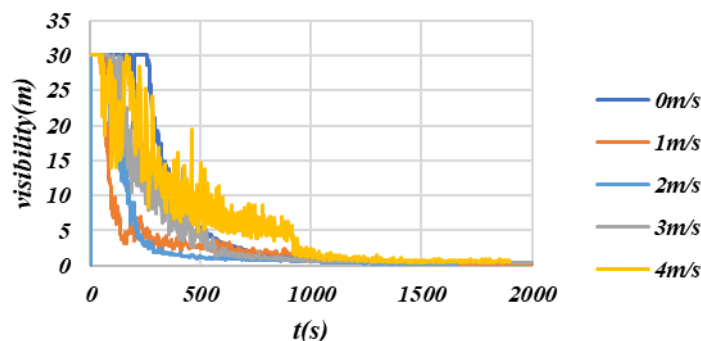


Διάγραμμα 216: Διάγραμμα συσχέτισης ταχυτήτων του αέρα σε συνάρτηση με την ορατότητα κατά το πέρασ του χρόνου, στην οροφή της σήραγγας (απόσταση 540m).

Ορατότητα στην όδευση διαφυγής της σήραγγας

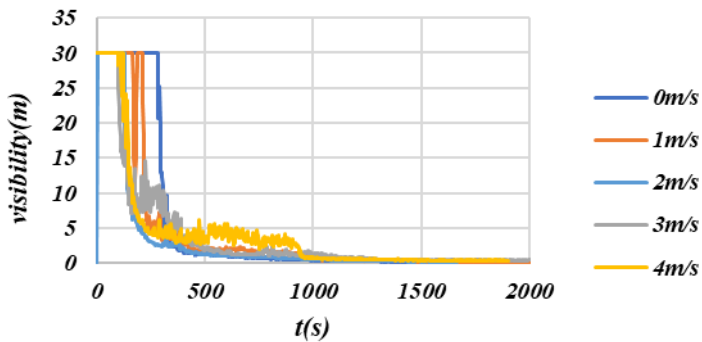
Η ορατότητα στην όδευση διαφυγής της σήραγγας σε διάφορες αποστάσεις από τη φωτιά παρατηρείται από τα παρακάτω διαγράμματα (Διάγραμμα 181, 182, 183 και 184 αντίστοιχα) η αύξηση της ταχύτητας του αέρα επισπεύδει την διασπορά του καπνού, με αποτέλεσμα τη μείωση της ορατότητας σε μικρότερο χρονικό διάστημα. Πιο συγκεκριμένα σε όλες της περιπτώσεις πέφτει η ορατότητα κάτω από 2 m/s αλλά στην περίπτωση που δεν έχουμε αέρα 0 m/s είναι αναμενόμενο να καθυστερήσει κατά μήκος της σήραγγας να μειωθεί η ορατότητα.

Διάγραμμα visibility(m)60m-t(s)



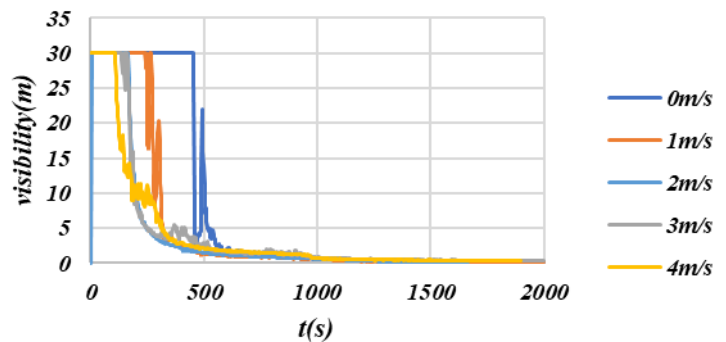
Διάγραμμα 217: Διάγραμμα συσχέτισης ταχυτήτων του αέρα σε συνάρτηση με την ορατότητα κατά το πέρασ του χρόνου, στην όδευση διαφυγής της σήραγγας (απόσταση 60m).

Διάγραμμα visibility(m)180m-t(s)



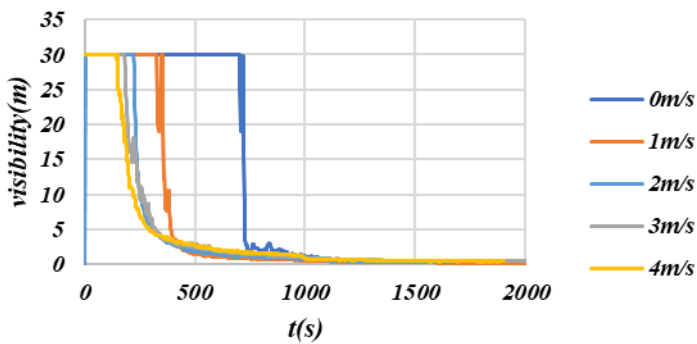
Διάγραμμα 218: Διάγραμμα συσχέτισης ταχυτήτων του αέρα σε συνάρτηση με την ορατότητα κατά το πέρας του χρόνου, στην όδευση διαφυγής της σήραγγας (απόσταση 180m).

Διάγραμμα visibility(m)300m-t(s)



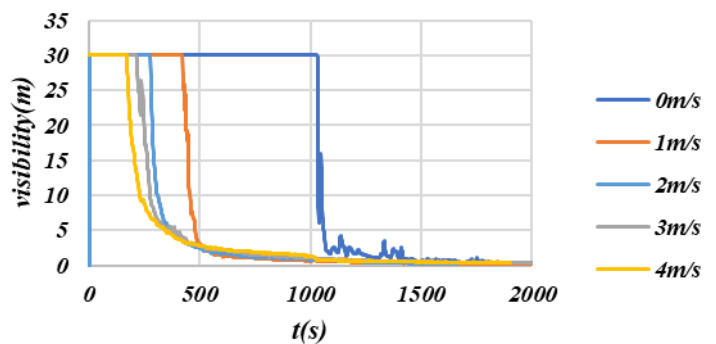
Διάγραμμα 219: Διάγραμμα συσχέτισης ταχυτήτων του αέρα σε συνάρτηση με την ορατότητα κατά το πέρας του χρόνου, στην όδευση διαφυγής της σήραγγας (απόσταση 300m).

Διάγραμμα visibility(m)420m-t(s)



Διάγραμμα 220: Διάγραμμα συσχέτισης ταχυτήτων του αέρα σε συνάρτηση με την ορατότητα κατά το πέρας του χρόνου, στην όδευση διαφυγής της σήραγγας (απόσταση 420m).

Διάγραμμα visibility(m)540m-t(s)



Διάγραμμα 221: Διάγραμμα συσχέτισης ταχυτήτων του αέρα σε συνάρτηση με την ορατότητα κατά το πέρας του χρόνου, στην όδευση διαφυγής της σήραγγας (απόσταση 540m).

Κεφάλαιο 5 : Προσομοίωση σεναρίων στο Pathfinder

Με το πρόγραμμα Pathfinder δίνεται η δυνατότητα πολλών παραμετρικών αναλύσεων διαφοροποιώντας κάθε φορά διάφορους συντελεστές, όπως ο αριθμός των χρηστών, ο αριθμός των εξόδων, η ταχύτητα κίνησης και άλλες συνθήκες συμπεριφοράς. Επίσης

στις λειτουργίες του λογισμικού προσομοίωσης είναι η δυνατότητα της παρουσίασης της ζωντανής κίνησης των χρηστών με ανθρώπινη μορφή. Ο λόγος που χρησιμοποιείται το Pathfinder είναι για την μελέτη του FED of Toxicity (Fractional Effective Dose- Κλασματική δραστική δόση) δηλαδή αν με την αύξηση της ταχύτητας αέρα βοηθάει στην εκκένωση των επιβατών.

5.1 Σχεδιασμός σήραγγας

Στη παρούσα μελέτη επιλέχθηκε η προσομοίωση της ακινητοποίησης των επιβατών. Σχεδιάστηκαν τα χαρακτηριστικά της σήραγγας ίδια με τον σχεδιασμό του Pyrosim. Επίσης σχεδιάστηκε και η όδευση διαφυγής. Οι επιβάτες τοποθετήθηκαν σε θέσεις απόστασης από την φωτιά όπως: δίπλα από την φωτιά, 60 m, 180 m, 300 m, 420 m και 540 m.



Εικόνα 55: Σχεδιασμός σήραγγας.

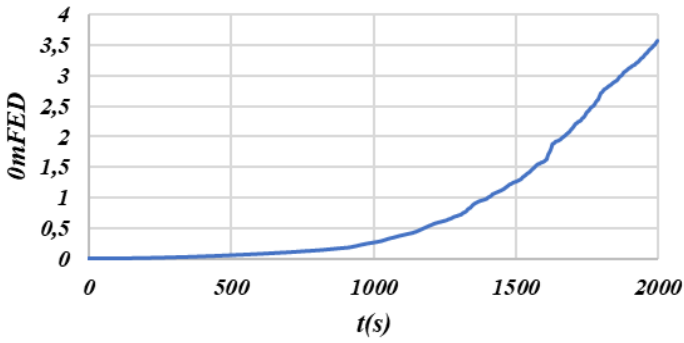
5.2.1 Σενάριο 1

Στο πρώτο σενάριο η ταχύτητα του αέρα είναι 0 m/s.

Σε διάφορες αποστάσεις από την φωτιά (0 m, 60m, 180m, 300m, 420 και 540) τα αποτελέσματα που προκύπτουν είναι τα εξής:

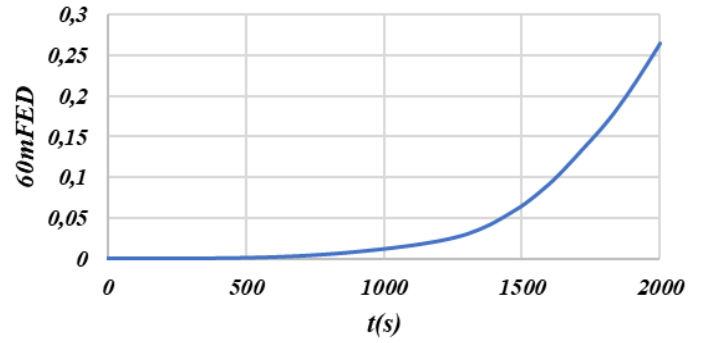
- Παρατηρούνται ότι στα διαγράμματα FED of Toxicity σε συνάρτηση του χρόνου (Διαγράμματα 187, 188, 189, 190 και 191 αντίστοιχα), οι τιμές FED αυξάνονται με το πέρασμα του χρόνου. Επίσης οι τιμές μπορεί να αυξάνονται αλλά είναι μικρότερες του κρίσιμου ορίου (FED of Toxicity<1). Στο διάγραμμα (Διάγραμμα 186 αντίστοιχα) με απόσταση 0 m από την φωτιά παρατηρούμε ότι οι τιμές είναι υψηλότερες του κρίσιμου ορίου (FED of Toxicity<1) με το πέρασμα του χρόνου.

Διάγραμμα 0mFED-t(s)



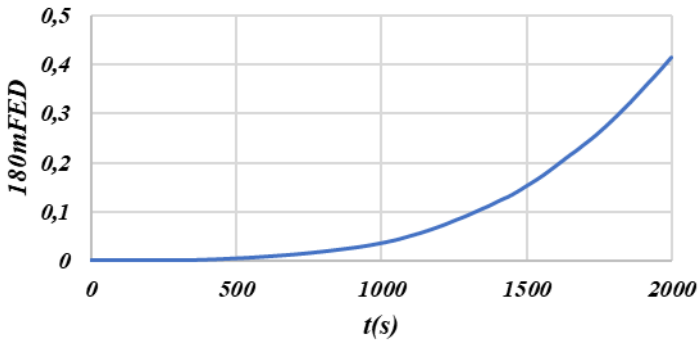
Διάγραμμα 222: Διάγραμμα FED of Toxicity σε συνάρτηση με τον χρόνο (απόσταση 0 m).

Διάγραμμα 60mFED-t(s)



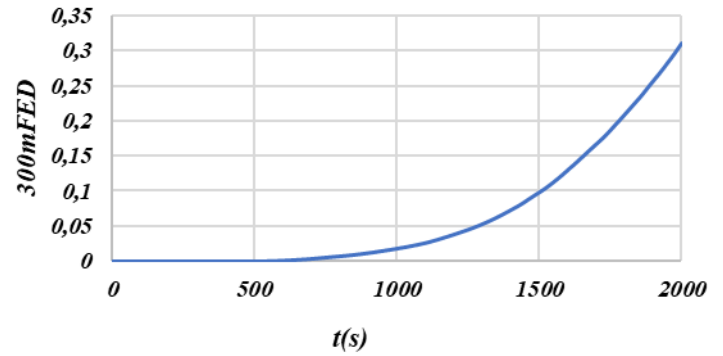
Διάγραμμα 223: Διάγραμμα FED of Toxicity σε συνάρτηση με τον χρόνο (απόσταση 60 m).

Διάγραμμα 180mFED-t(s)



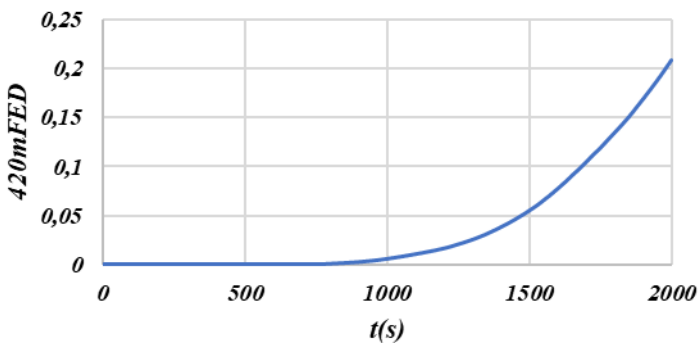
Διάγραμμα 224: Διάγραμμα FED of Toxicity σε συνάρτηση με τον χρόνο (απόσταση 180 m).

Διάγραμμα 300mFED-t(s)



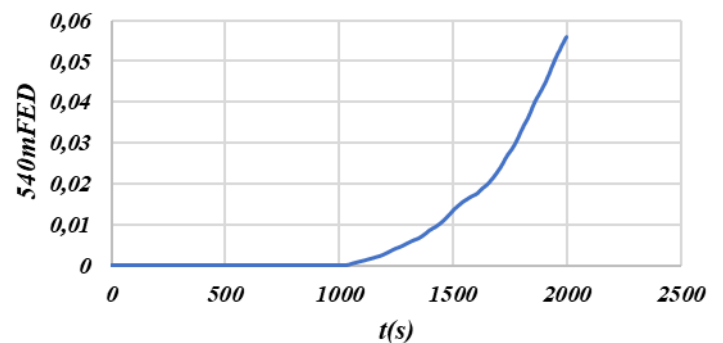
Διάγραμμα 225: Διάγραμμα FED of Toxicity σε συνάρτηση με τον χρόνο (απόσταση 300 m).

Διάγραμμα 420mFED-t(s)



Διάγραμμα 226: Διάγραμμα FED of Toxicity σε συνάρτηση με τον χρόνο (απόσταση 420 m).

Διάγραμμα t(s)-540mFED



Διάγραμμα 227: Διάγραμμα FED of Toxicity σε συνάρτηση με τον χρόνο (απόσταση 540 m).

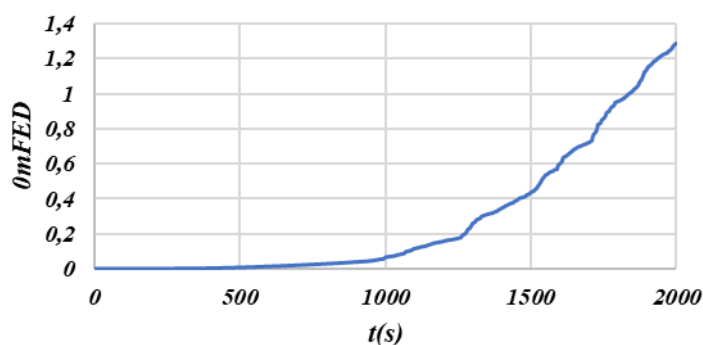
5.2.2 Σενάριο 2

Στο δεύτερο σενάριο η ταχύτητων του αέρα είναι 1 m/s.

Σε διάφορες αποστάσεις από την φωτιά (0 m, 60m, 180m, 300m, 420 και 540) τα αποτελέσματα που προκύπτουν είναι τα εξής:

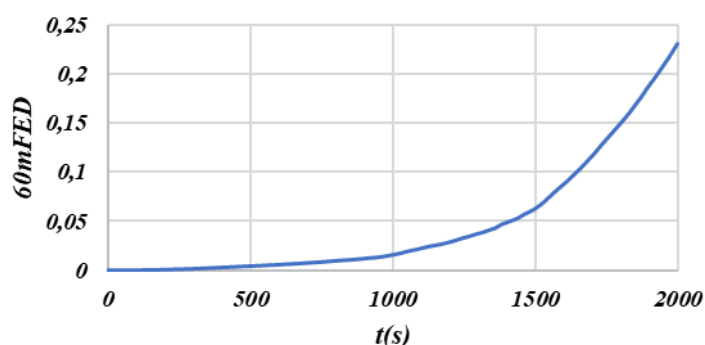
- Παρατηρούνται ότι στα διαγράμματα FED of Toxicity σε συνάρτηση του χρόνου (Διαγράμματα 193, 194, 195, 196 και 197 αντίστοιχα), οι τιμές FED αυξάνονται με το πέρασμα του χρόνου. Επίσης οι τιμές μπορεί να αυξάνονται αλλά είναι μικρότερες του κρίσιμου ορίου ($FED\ of\ Toxicity < 1$). Στο διάγραμμα (Διάγραμμα 192 αντίστοιχα) με απόσταση 0 m από την φωτιά παρατηρούμε ότι οι τιμές είναι υψηλότερες του κρίσιμου ορίου ($FED\ of\ Toxicity < 1$) με το πέρασμα του χρόνου.

Διάγραμμα 0mFED-t(s)



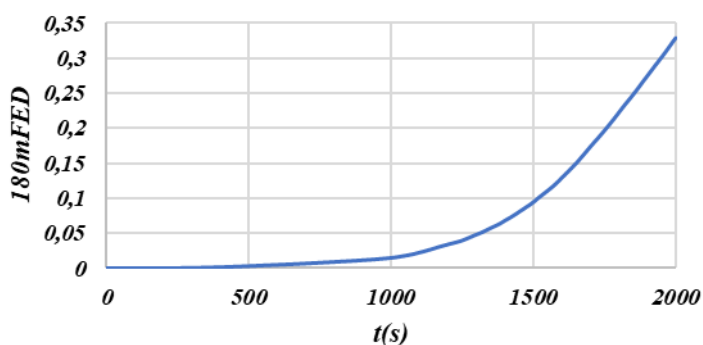
Διάγραμμα 228: Διάγραμμα FED of Toxicity σε συνάρτηση με τον χρόνο (απόσταση 0 m).

Διάγραμμα 60mFED-t(s)



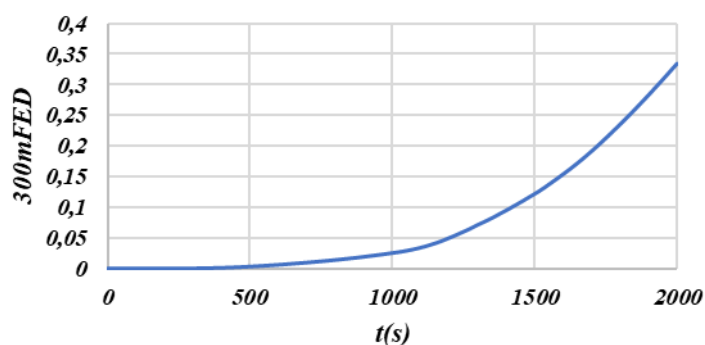
Διάγραμμα 229: Διάγραμμα FED of Toxicity σε συνάρτηση με τον χρόνο (απόσταση 60 m).

Διάγραμμα 180mFED-t(s)



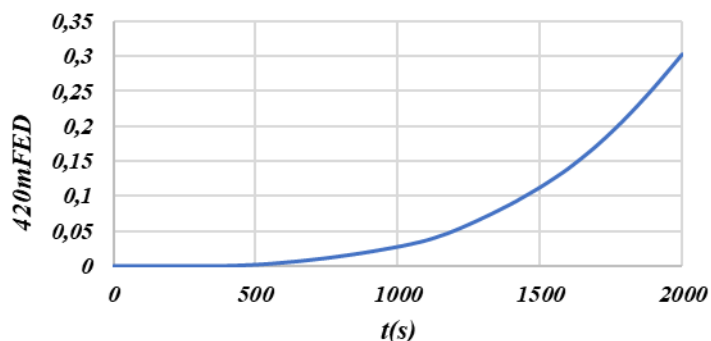
Διάγραμμα 230: Διάγραμμα FED of Toxicity σε συνάρτηση με τον χρόνο (απόσταση 180 m).

Διάγραμμα 300mFED-t(s)



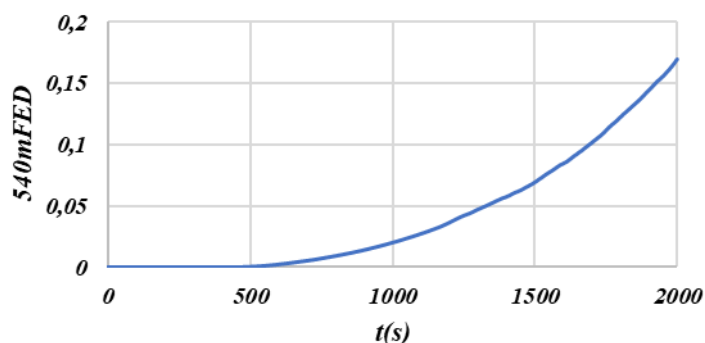
Διάγραμμα 231: Διάγραμμα FED of Toxicity σε συνάρτηση με τον χρόνο (απόσταση 300 m).

Διάγραμμα 420mFED-t(s)



Διάγραμμα 232: Διάγραμμα FED of Toxicity σε συνάρτηση με τον χρόνο (απόσταση 420 m).

Διάγραμμα 540mFED-t(s)



Διάγραμμα 233: Διάγραμμα FED of Toxicity σε συνάρτηση με τον χρόνο (απόσταση 540 m).

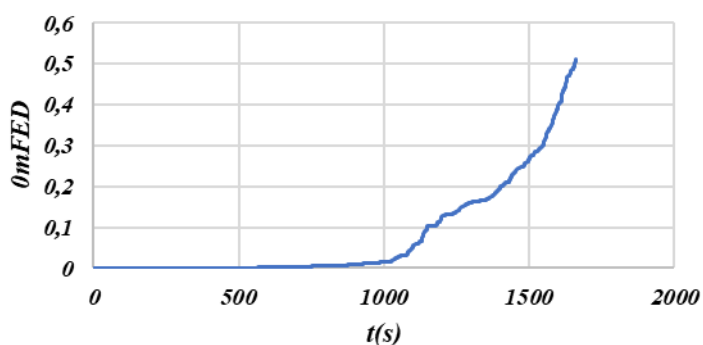
5.2.3 Σενάριο 3

Στο τρίτο σενάριο η ταχύτητων του αέρα είναι 2 m/s.

Σε διάφορες αποστάσεις από την φωτιά (0 m, 60m, 180m, 300m, 420 και 540) τα αποτελέσματα που προκύπτουν είναι τα εξής:

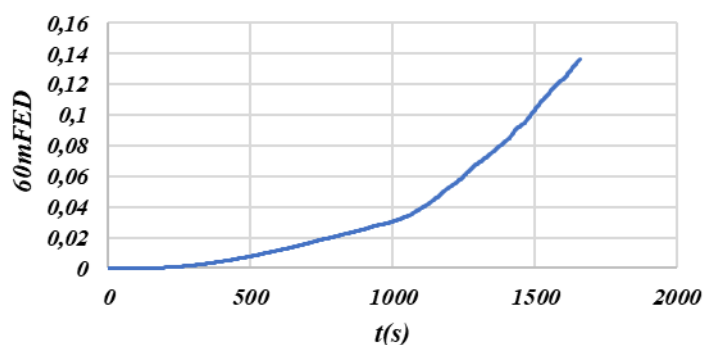
- Παρατηρούνται ότι στα διαγράμματα FED of Toxicity σε συνάρτηση του χρόνου (Διαγράμματα 198, 199, 200, 201, 202 και 203 αντίστοιχα), οι τιμές FED αυξάνονται με το πέρασμα του χρόνου. Επίσης οι τιμές μπορεί να αυξάνονται αλλά είναι μικρότερες του κρίσιμου ορίου ($FED\ of\ Toxicity < 1$).

Διάγραμμα 0mFED-t(s)



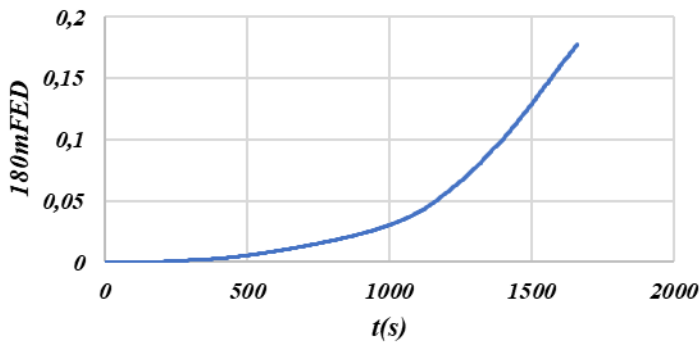
Διάγραμμα 234: Διάγραμμα FED of Toxicity σε συνάρτηση με τον χρόνο (απόσταση 0 m).

Διάγραμμα 60mFED-t(s)



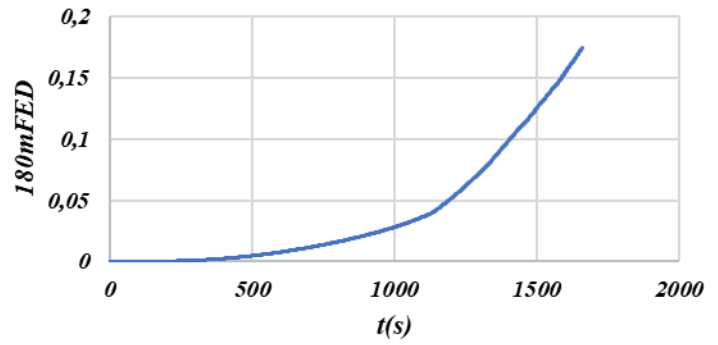
Διάγραμμα 235: Διάγραμμα FED of Toxicity σε συνάρτηση με τον χρόνο (απόσταση 60 m).

Διάγραμμα 180mFED-t(s)



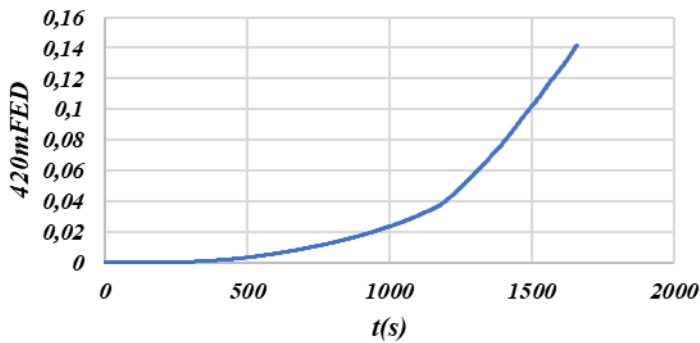
Διάγραμμα 236: Διάγραμμα FED of Toxicity σε συνάρτηση με τον χρόνο (απόσταση 180 m).

Διάγραμμα 300mFED-t(s)



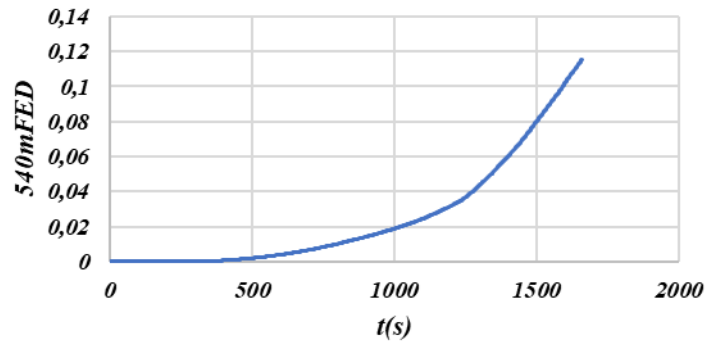
Διάγραμμα 237: Διάγραμμα FED of Toxicity σε συνάρτηση με τον χρόνο (απόσταση 300 m).

Διάγραμμα 420mFED-t(s)



Διάγραμμα 238: Διάγραμμα FED of Toxicity σε συνάρτηση με τον χρόνο (απόσταση 420 m).

Διάγραμμα 540mFED-t(s)



Διάγραμμα 239: Διάγραμμα FED of Toxicity σε συνάρτηση με τον χρόνο (απόσταση 540 m).

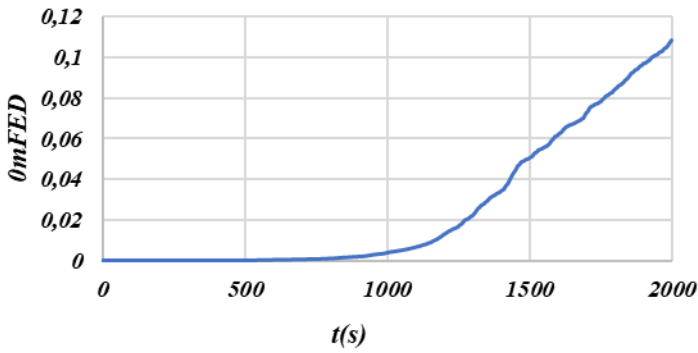
5.2.4 Σενάριο 4

Στο τέταρτο σενάριο η ταχύτητα του αέρα είναι 3 m/s.

Σε διάφορες αποστάσεις από την φωτιά (0 m, 60m, 180m, 300m, 420 και 540) τα αποτελέσματα που προκύπτουν είναι τα εξής:

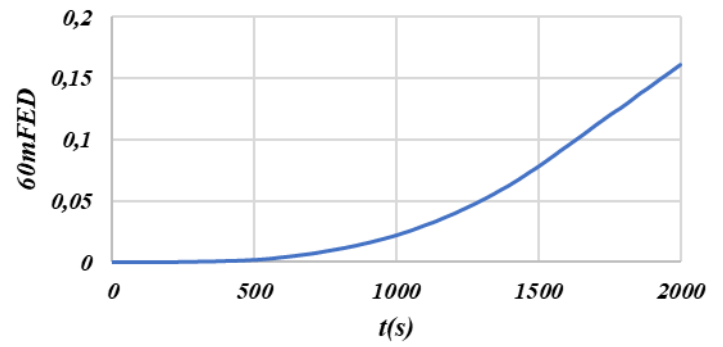
- Παρατηρούνται ότι στα διαγράμματα FED of Toxicity σε συνάρτηση του χρόνου (Διαγράμματα 204, 205, 206, 207, 208 και 209 αντίστοιχα), οι τιμές FED αυξάνονται με το πέρασμα του χρόνου. Επίσης οι τιμές μπορεί να αυξάνονται αλλά είναι μικρότερες του κρίσιμου ορίου (FED of Toxicity<1).

Διάγραμμα 0mFED-t(s)



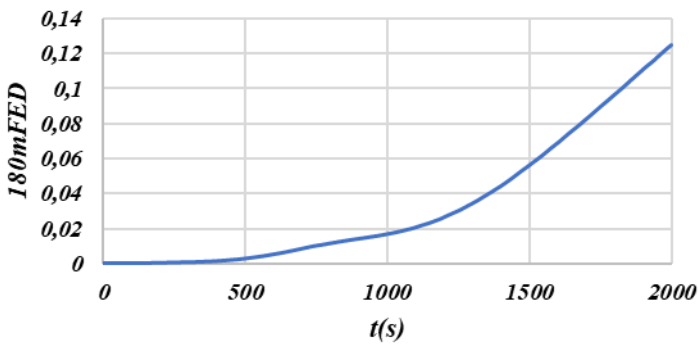
Διάγραμμα 240: Διάγραμμα FED of Toxicity σε συνάρτηση με τον χρόνο (απόσταση 0 m).

Διάγραμμα 60mFED-t(s)



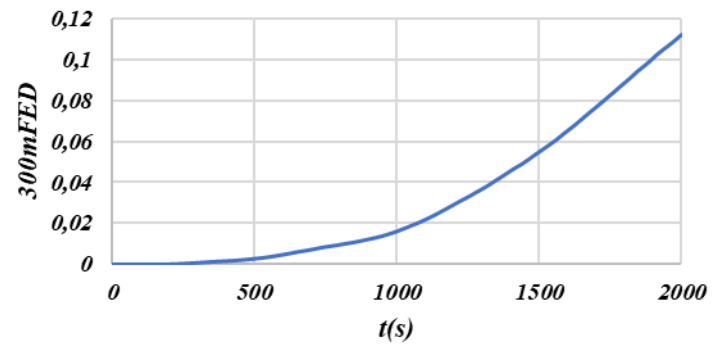
Διάγραμμα 241: Διάγραμμα FED of Toxicity σε συνάρτηση με τον χρόνο (απόσταση 60 m).

Διάγραμμα 180mFED-t(s)



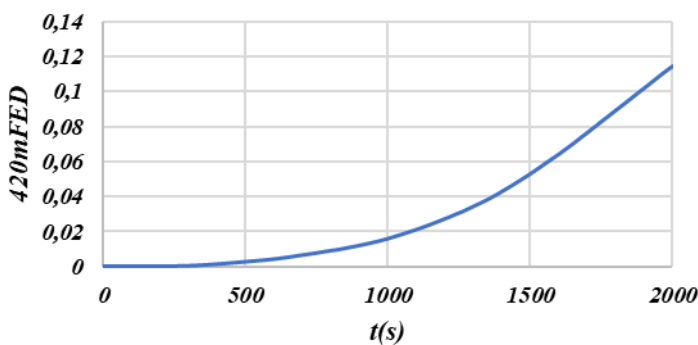
Διάγραμμα 242: Διάγραμμα FED of Toxicity σε συνάρτηση με τον χρόνο (απόσταση 180 m).

Διάγραμμα 300mFED-t(s)



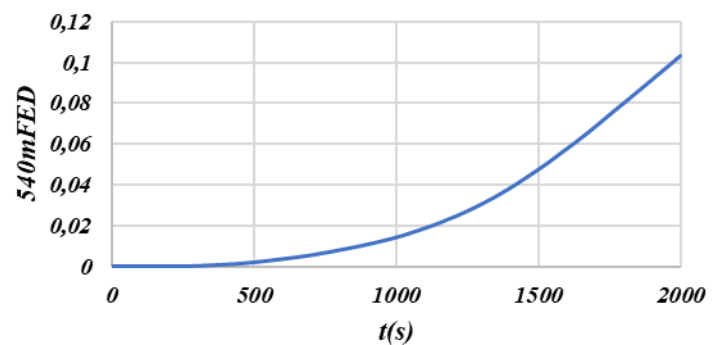
Διάγραμμα 243: Διάγραμμα FED of Toxicity σε συνάρτηση με τον χρόνο (απόσταση 300 m).

Διάγραμμα 420mFED-t(s)



Διάγραμμα 244: Διάγραμμα FED of Toxicity σε συνάρτηση με τον χρόνο (απόσταση 420 m).

Διάγραμμα 540mFED-t(s)



Διάγραμμα 245: Διάγραμμα FED of Toxicity σε συνάρτηση με τον χρόνο (απόσταση 540 m).

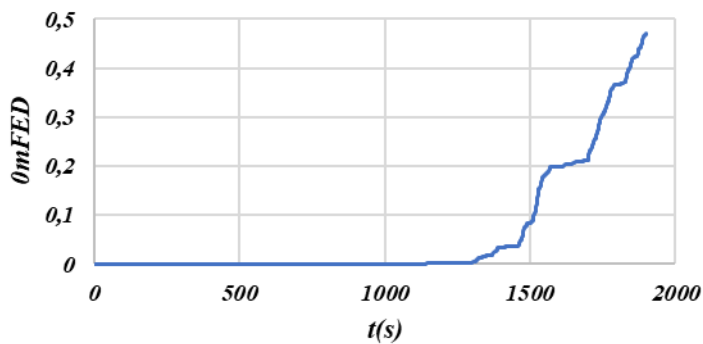
5.2.5 Σενάριο 5

Στο πέμπτο σενάριο η ταχύτητα του αέρα είναι 4 m/s.

Σε διάφορες αποστάσεις από την φωτιά (0 m, 60m, 180m, 300m, 420 και 540) τα αποτελέσματα που προκύπτουν είναι τα εξής:

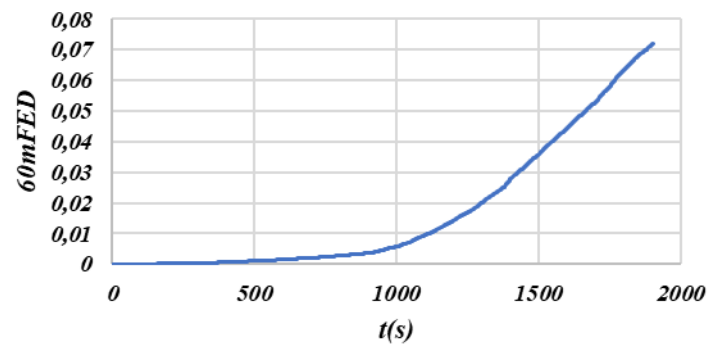
- Παρατηρούνται ότι στα διαγράμματα FED of Toxicity σε συνάρτηση του χρόνου (Διαγράμματα 210, 211, 212, 213, 214 και 215 αντίστοιχα), οι τιμές FED αυξάνονται με το πέρασμα του χρόνου. Επίσης οι τιμές μπορεί να αυξάνονται αλλά είναι μικρότερες του κρίσιμου ορίου (FED of Toxicity<1).

Διάγραμμα 0mFED-t(s)



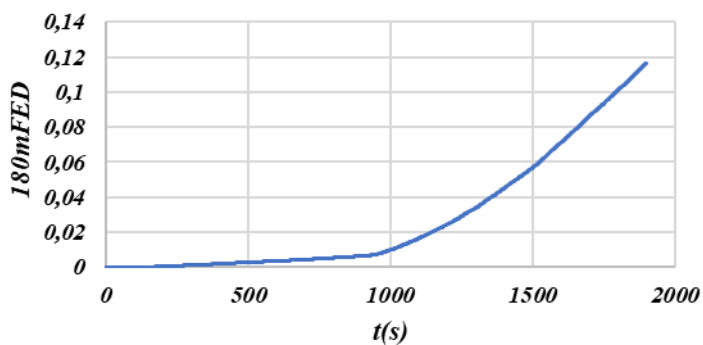
Διάγραμμα 246: Διάγραμμα FED of Toxicity σε συνάρτηση με τον χρόνο (απόσταση 0 m).

Διάγραμμα 60mFED-t(s)



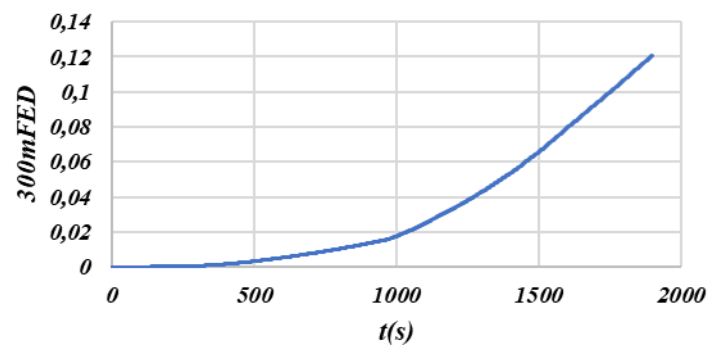
Διάγραμμα 247: Διάγραμμα FED of Toxicity σε συνάρτηση με τον χρόνο (απόσταση 60 m).

Διάγραμμα 180mFED-t(s)



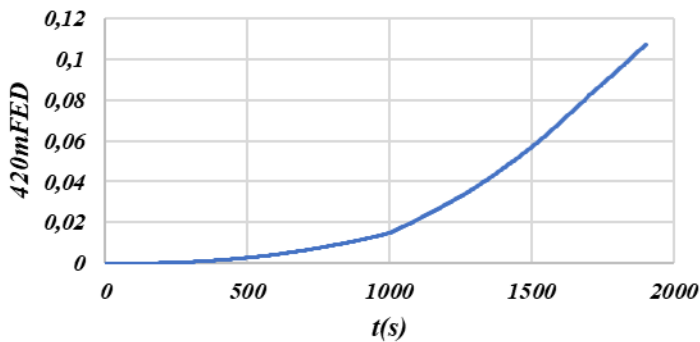
Διάγραμμα 248: Διάγραμμα FED of Toxicity σε συνάρτηση με τον χρόνο (απόσταση 180 m).

Διάγραμμα 300mFED-t(s)



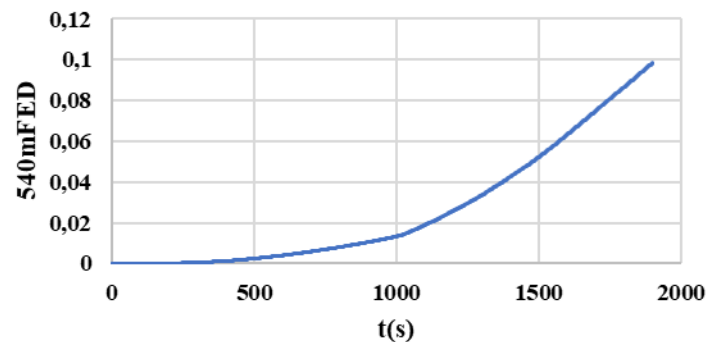
Διάγραμμα 249: Διάγραμμα FED of Toxicity σε συνάρτηση με τον χρόνο (απόσταση 300 m).

Διάγραμμα 420mFED-t(s)



Διάγραμμα 250: Διάγραμμα FED of Toxicity σε συνάρτηση με τον χρόνο (απόσταση 420 m).

Διάγραμμα 540mFED-t(s)

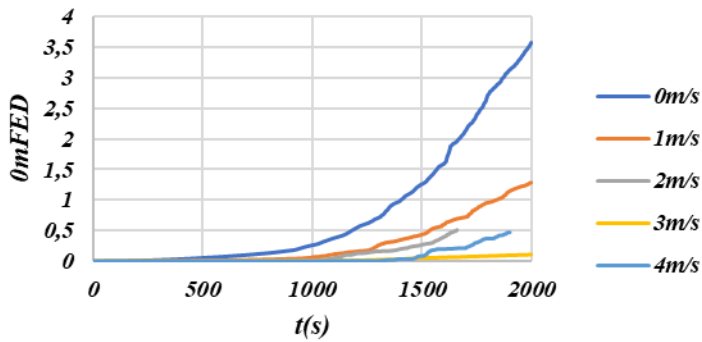


Διάγραμμα 251: Διάγραμμα FED of Toxicity σε συνάρτηση με τον χρόνο (απόσταση 540 m).

5.3 Αποτελέσματα σεναρίων Pathfinder

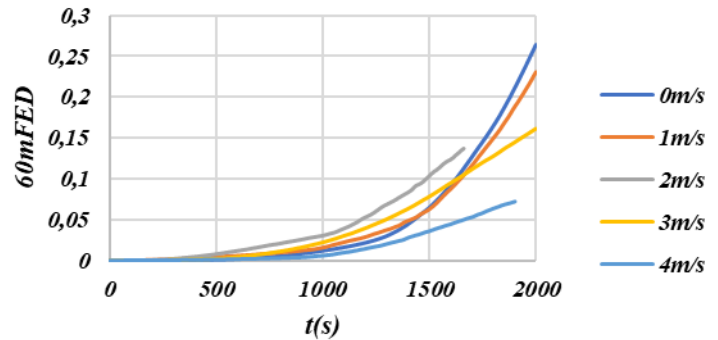
Τα αποτελέσματα που προέκυψαν με την αύξηση της ταχύτητας **του αέρα** σε διάφορες αποστάσεις από την φωτιά (Διάγραμμα 217, 218, 219, 220 και 221 αντίστοιχα) παρέμειναν σε τιμές μικρότερες του κρίσιμου ορίου ($FED\ of\ Toxicity < 1$) για 2000 s που μελετήσαμε στο ύψος των ανθρώπων. Στο διάγραμμα (Διάγραμμα 216 αντίστοιχα) με απόσταση 0 m όταν δεν έχουμε ταχύτητα αέρα κοντά στη φωτιά η επιδείνωση είναι υψηλότερη γιατί ο καπνός παράγεται δίπλα στη φωτιά και στην άλλη περίπτωση η ταχύτητα του αέρα τον διώχνει μακριά. Ενώ στα (Διάγραμμα 217, 218 αντίστοιχα) 60 m και 180 m οι τιμές του FED είναι αυξημένες χωρίς ταχύτητα στη συνέχεια όσο απομακρυνόμαστε από την φωτιά παρατηρούμε ότι το FED αυξάνεται πιο γρήγορα γιατί παρόλο που έχουμε μικρότερες συγκεντρώσεις φτάνουν πιο γρήγορα τον καπνό σε αυτά τα σημεία ώστε το FED να ανεβαίνει.

Διάγραμμα 0mFED-t(s)



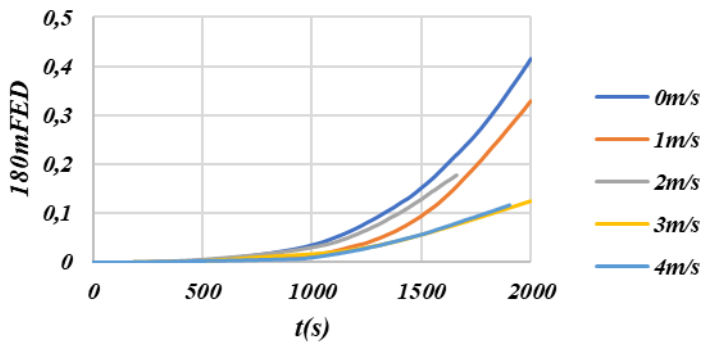
Διάγραμμα 252: Διάγραμμα συσχέτισης ταχυτήτων του αέρα σε συνάρτηση με το FED of Toxicity κατά το πέρασ του χρόνου, στην οροφή της σήραγγας (απόσταση 0m).

Διάγραμμα 60mFED-t(s)



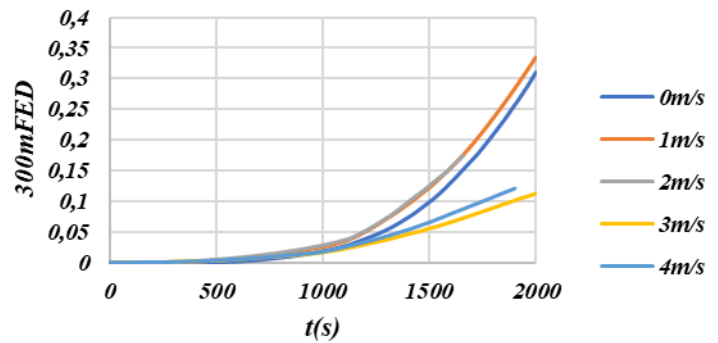
Διάγραμμα 253: Διάγραμμα συσχέτισης ταχυτήτων του αέρα σε συνάρτηση με το FED of Toxicity κατά το πέρασ του χρόνου, στην οροφή της σήραγγας (απόσταση 60m).

Διάγραμμα 180mFED-t(s)



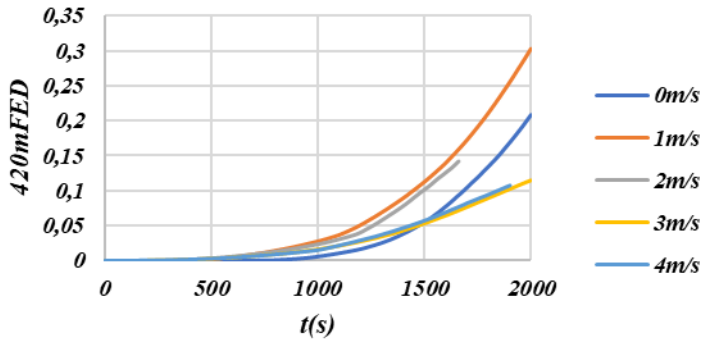
Διάγραμμα 254: Διάγραμμα συσχέτισης ταχυτήτων του αέρα σε συνάρτηση με το FED of Toxicity κατά το πέρασ του χρόνου, στην οροφή της σήραγγας (απόσταση 180m).

Διάγραμμα 300mFED-t(s)



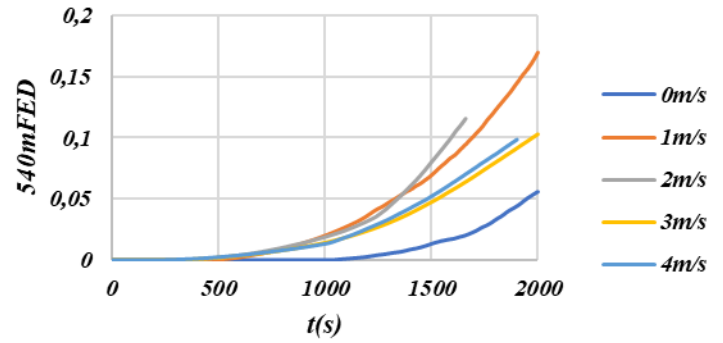
Διάγραμμα 255: Διάγραμμα συσχέτισης ταχυτήτων του αέρα σε συνάρτηση με το FED of Toxicity κατά το πέρασ του χρόνου, στην οροφή της σήραγγας (απόσταση 300m).

Διάγραμμα 420mFED-t(s)



Διάγραμμα 256: Διάγραμμα συσχέτισης ταχυτήτων του αέρα σε συνάρτηση με το FED of Toxicity κατά το πέρασ του χρόνου, στην οροφή της σήραγγας (απόσταση 420m).

Διάγραμμα 540mFED-t(s)



Διάγραμμα 257: Διάγραμμα συσχέτισης ταχυτήτων του αέρα σε συνάρτηση με το FED of Toxicity κατά το πέρασ του χρόνου, στην οροφή της σήραγγας (απόσταση 540m).

Συμπεράσματα

Τα υπόγεια έργα είναι μια επιστήμη, η οποία εξελίσσεται συνεχώς και σε γρήγορους ρυθμούς. Η μελέτη και ο σχεδιασμός υπόγειων έργων είναι ο τομέας της ασφάλειας και ειδικότερα η διαδικασία εκκένωσης στην περίπτωση που προκύψει μία επείγουσα κατάσταση.

Ιδιαίτερη έμφαση πρέπει να δίνεται στη περίπτωση εκδήλωσης φωτιάς καθώς αυτή επηρεάζει το σχεδιασμό της εκκένωσης, γιατί στις περισσότερες των περιπτώσεων ο καπνός και οι χρήστες που προσπαθούν να διαφύγουν ακολουθούν το ίδιο μονοπάτι.

Στις περισσότερες πυρκαγιές που έχουν ξεσπάσει σε διάφορους χώρους η έλλειψη ορατότητας λόγω αυξανόμενης συγκέντρωσης του καπνού είναι η πρώτη κατάσταση που εμποδίζει τους ανθρώπους να κινηθούν και επομένως να διαφύγουν με ασφάλεια. Η ύπαρξη καπνού επιβαρύνει ψυχολογικά και σωματικά τα άτομα που εκκενώνουν τον χώρο.

Η επίδραση της πυρκαγιάς στη συμπεριφορά των χρηστών και στην ταχύτητα κίνησης μπορεί να προσομοιωθεί και να ποσοτικοποιηθεί μέσω του λογισμικού Pyrosim. Το συγκεκριμένο λογισμικό προσφέρει λεπτομέρειες για την εξέλιξη του φαινομένου της πυρκαγιάς και οδηγεί σε συμπεράσματα για το χρόνο που είναι διαθέσιμος για την εκκένωση πριν φτάσουν σε απαγορευτικά όρια οι τιμές καπνού, του θερμικού φορτίου και των προϊόντων της καύσης. Ο σχεδιασμός και ο έλεγχος της επάρκειας των διαδικασιών εκκένωσης διενεργείται με τη χρήση του λογισμικού Pathfinder που προσομοιώνει τη συγκεκριμένη διαδικασία. Ειδικότερα, το συγκεκριμένο μοντέλο προσομοίωσης έχει τη δυνατότητα να απεικονίζει με ρεαλισμό την εκκένωση και την κίνηση των ατόμων. Η ανάλυση αυτή, καθώς και η εισαγωγή παραμέτρων που αφορούν στον τρόπο συμπεριφοράς του πλήθους κατά την διάρκεια της εκκένωσης πολύ απλά δεν μπορούν να γίνουν με τις συμβατικές αναλύσεις εκκένωσης.

Στην παρούσα μελέτη, τα αποτελέσματα που προκύπτουν από το πρόγραμμα Pyrosim είναι ότι με την αύξηση ταχύτητας του αέρα οδηγεί σε αύξησή της θερμοκρασίας, και μείωση της συγκέντρωσης του CO και τα δυο λαμβάνουν μέγιστες τιμές πιο γρήγορα κατά μήκος της σήραγγας. Ανάλογα με την ταχύτητα του αέρα που υπάρχει μέσα στη σήραγγα πρέπει να ληφθούν υπόψη και οι δυο παράγοντες για την χρονική στιγμή ανάλογα με τη ταχύτητα αέρα που πρέπει να ξεκινήσει η εκκένωση. Επιπλέον, μειώνεται γρηγορότερα η ορατότητα το οποίο σημαίνει μικρότερη ταχύτητα άρα και μεγαλύτερος χρόνος εκκένωσης με αποτέλεσμα οι επιβάτες να παραμείνουν σε κακές συνθήκες.

Στη συνέχεια με την αύξηση της ταχύτητας του αέρα γίνεται η χρήση του προγράμματος Pathfinder για την μελέτη του FED of Toxicity. Από τα βιβλιογραφικά δεδομένα το κρίσιμο όριο θνησιμότητας βρίσκεται στην τιμή του 1. Στην παρούσα μελέτη, τα αποτελέσματα που προέκυψαν με την αύξηση της ταχυτήτων του αέρα, παρέμειναν σε τιμές μικρότερες του κρίσιμου ορίου ($FED\ of\ Toxicity < 1$). Ο

κανονισμός αναφέρει ότι τιμές του δείκτη ≥ 1 επιφέρουν θάνατο και ότι τα ανεκτά όρια είναι για τιμές $\leq 0,3$ γιατί πάνω από αυτές παρουσιάζονται διαφορά πρόβλημα (αναπνευστικά, αισθήσεων κ.α.). Άρα ως μέγιστο επιτρεπτό όριο για το δείκτη FED of Toxicity τίθεται η τιμή 0,3.

Τέλος, παρατηρούμε ότι η ταχύτητα του αέρα επιδρά με διαφορετικό τρόπο ανάλογα με την απόσταση από την φωτιά. Το γεγονός αυτό θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη για την απόφαση του χρονικού σημείου που πρέπει να ξεκινήσει η εκκένωση. Η πληροφορία που προκύπτει από την παρούσα εργασία μπορεί να αποτελέσει την βάση για τον προσδιορισμό του βέλτιστου χρονικού σημείου για την έναρξη της εκκένωσης. Πιο συγκεκριμένα προσδιορίστηκαν οι συνθήκες που επικρατούν στη σήραγγα. Σε επόμενο στάδιο θα πρέπει να αναλυθεί ο χρόνος εκκένωσης των επιβατών εν κινήσει σε συνδυασμό με την θερμοκρασία που θα υπάρχει σε κάθε σημείο της διαδρομής.

Βιβλιογραφία

- Baku Metro Fire (1995) |. (n.d.). Retrieved September 9, 2021, from <http://www.railsystem.net/baku-metro-fire-1995/>
- Cocking, C., & Drury, J. (2008). The mass psychology of disasters and emergency evacuations: A research report and implications for the Fire and Rescue Service. *Fire Safety Technology and Management*, 10(November 2015), 13–19.
- File:Fire triangle EL.svg - Wikimedia Commons. (n.d.). Retrieved September 8, 2021, from https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Fire_triangle_EL.svg
- Fridolf, K., Nilsson, D., & Frantzich, H. (2013, March 6). Fire Evacuation in Underground Transportation Systems: A Review of Accidents and Empirical Research. *Fire Technology*, Vol. 49, pp. 451–475. <https://doi.org/10.1007/s10694-011-0217-x>
- General Thematic Network Fire in Tunnels: General report.* (n.d.).
- Haddad, R. K., Maluk, C., Reda, E., & Harun, Z. (2019). Critical Velocity and Backlayering Conditions in Rail Tunnel Fires: State-of-The-Art Review. *Journal of Combustion*, 2019. <https://doi.org/10.1155/2019/3510245>
- HSE Professionals : Fire Stages & Fire Types? (n.d.). Retrieved October 1, 2021, from <http://hseprofessionals.blogspot.com/2014/01/fire-stages-fire-types.html>
- Korhonen, T., & Hostikka, S. (2010). Fire Dynamics Simulator with Evacuation: FDS+Evac, Technical Reference and User's Guide (FDS 5.5.0, Evac 2.2.1).
- McAllister, D. A. P. and J. L. (2016). Assessment of hazards to occupants from smoke, toxic gases, and heat. In *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, Fifth Edition* (pp. 2308–2428).
- Meacham, B. J. (2017). Nfpa ® 2017. In *NFPA 550 Guide to the Fire Safety Concepts Tree*.
- OSHA. (2001). How to Plan for Workplace Emergencies and Evacuations. *Occupational Safety and Health Administration, OSHA 3088*, 5–25. Retrieved f
- Pyro Sim Manual | PDF |. (n.d.). Retrieved October 2, 2021, from <https://www.scribd.com/document/352468765/Pyro-Sim-Manual>
- Sakkas K. et al. (2010). *Fire Protection of Tunnels*. 1–7.
- Salmensaari, T. (2010). Safety in Long Subsea Rail. *Tunnel Safety in General*, 9–11.
- SFPE, 2016. (2016). *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, 5th Edition*. Society of Fire Protection Engineers.
- South Korea Daegu Subway Station – Arson |. (n.d.). Retrieved September 9, 2021, from <http://www.railsystem.net/south-korea-daegu-subway-station-arson/>
- Ventilation, A. B. (2015). Fire Protection Association Report. *Nfpa*, (14), 28–33.
- Yamada, T. & Akizuki, Y. (2016). Visibility and human behavior in fire smoke. In *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, Fifth Edition* (pp. 2181–2206).

https://doi.org/10.1007/978-1-4939-2565-0_61

Αναστάσιος Κ. Καλλιανιώτης. (2015). *Βελτιστοποίηση συνθηκών εκκένωσης υπογείων χώρων: αξιολόγηση και βελτιστοποίηση θέσεων εξόδων διαφυγής*. Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.